



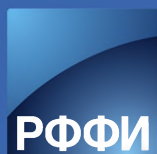
**НКТМ
РАН**



N*



**НГТУ
НЭТИ**



**IV Всероссийская научная конференция
с элементами школы молодых учёных**

ТЕПЛОФИЗИКА и ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА

**Ялта, Республика Крым,
отель "Ливадийский"
15-22 сентября 2019 г.**

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Сибирское отделение РАН

**Отделение энергетики, машиностроения,
механики и процессов управления РАН**

Российский национальный комитет по тепломассообмену

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Новосибирский государственный технический университет

Морской гидрофизический институт РАН

Российский фонд фундаментальных исследований

Конференция проводится при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации
дополнительное соглашение № 075-02-2019-1453/1

и

Российского фонда фундаментальных исследований
грант № 19-01-20064

Сибирское отделение РАН

**Отделение энергетики, машиностроения,
механики и процессов управления РАН**

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

**IV Всероссийская научная конференция
с элементами школы молодых учёных**

ТЕПЛОФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ГИДРОДИНАМИКА

**Ялта, Республика Крым,
отель "Ливадийский"
15-22 сентября 2019 г.**

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Новосибирск 2019

Сборник содержит тезисы докладов IV Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (ТФГ2019) с элементами школы молодых ученых. Конференция является продолжением серии всесоюзных конференций молодых исследователей, проводимых при участии Института теплофизики СО РАН с 70-х годов XX века. В этом году конференция проходит в г. Ялта. Организаторами конференции выступают Сибирское отделение Российской академии наук, Национальный комитет по тепло- и массообмену РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, Новосибирский государственный университет, Новосибирский государственный технический университет, Морской гидрофизический институт РАН. Целью конференции является обсуждение современных задач в области теплофизики и гидрогазодинамики, поиск путей их решения, а также подготовка научного кадрового резерва высокой квалификации и привлечение молодых ученых к наиболее актуальным исследованиям. В сборник включены тезисы докладов по следующим направлениям: теплообмен и гидродинамика в однофазных средах, гидродинамика и тепломассообмен в многофазных системах, фазовые переходы, гидрогазодинамика реагирующих сред, детонационные процессы, численные методы в теплофизике и физической гидрогазодинамике, методы и средства теплофизического и гидрогазодинамического эксперимента, теплофизические свойства веществ и новые материалы, тепломассообмен и гидродинамика на микро- и наномасштабах, электрофизические явления в газовых и жидких средах, теплообмен и гидродинамика в технологических процессах и защита окружающей среды. Материалы, представленные в сборнике, могут быть полезны студентам вузов, аспирантам и научным сотрудникам соответствующих специальностей.

Председатель

Маркович Д.М., член-корреспондент РАН

Заместитель

Головин С.В., профессор РАН, д.ф.-м.н.

Учёный секретарь

Макаров М.С., к.ф.-м.н.

Технический комитет

Смовж Д.В., к.ф.-м.н.

Медведев Р.Н., к.ф.-м.н.

Савченко И.В., к.ф.-м.н.

Наумкин В.С., к.ф.-м.н.

ООО «МКС» конгресс-организатор

Научный комитет

Алексеев С.В., академик РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Батаев А.А., профессор, д.т.н. (НГТУ, Новосибирск)

Васильев А.А., профессор, д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Губайдуллин А.А., профессор, д.ф.-м.н. (ИТПМ СО РАН, Тюмень)

Дёмышев С.Г., д.ф.-м.н. (МГИ РАН, Севастополь)

Елистратов С.Л., профессор, д.т.н. (НГТУ, Новосибирск)

Исаев С.А., профессор, д.ф.-м.н. (СПбГУГА, Санкт-Петербург)

Кабов О.А., профессор, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Кедринский В.К., профессор, д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Коротаев Г.К., член-корреспондент РАН (МГИ РАН, Севастополь)

Кубряков А.И., д.ф.-м.н. (МГИ РАН, Севастополь)

Кузнецов В.В., профессор, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Куйбин П.А., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Куперштох А.Л., профессор, д.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Леонтьев А. И., академик РАН (МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва)

Павленко А.Н., член-корреспондент РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Пруэлл Э.Р., к.ф.-м.н. (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Пухначёв В.В., член-корреспондент РАН (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Рыжков А.Ф., профессор, д.т.н. (УрФУ, Екатеринбург)

Самодуров А.С., д.ф.-м.н. (МГИ РАН, Севастополь)

Смирнов Е.М., профессор, д.ф.-м.н. (СПбПУ, Санкт-Петербург)

Станкус С.В., профессор, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Терехов В.И., профессор, д.т.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Терехов В.В., профессор РАН, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Титов В.М., академик РАН (ИГиЛ СО РАН, Новосибирск)

Токарев М.П., к.т.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Федорук М.П., член-корреспондент РАН (НГУ, Новосибирск)

Хабахпашев Г.А., д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Цвелодуб О.Ю., профессор, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Чернов А.А., профессор РАН, д.ф.-м.н. (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Издание сборника докладов производилось с авторских листов участников конференции.

За ошибки и опечатки авторов издательство ответственности не несёт.



ПЛЕНАРНЫЕ ЛЕКЦИИ



МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОРИСТЫХ СИСТЕМАХ С ГАЗОВЫМИ ГИДРАТАМИ

Губайдуллин А.А.^{1,2}, Мусакаев Н.Г.^{1,3}, Болдырева О.Ю.¹

¹ Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
625026, Россия, Тюмень, ул. Таймырская, 74

² Тюменский государственный университет,
625003, Россия, Тюмень, ул. Володарского, 6

³ Тюменский индустриальный университет,
625000, Россия, Тюмень, ул. Володарского, 38

В настоящее время использование природного газа (в первую очередь, метана) играет существенную роль в удовлетворении глобального спроса при производстве энергии [1, 2]. Потенциально большие запасы метана находятся в газогидратных залежах [3–6]. По некоторым оценкам объем газа в составе газовых гидратов в разы превышает аналогичный показатель в свободном состоянии [3, 7]. Промышленная добыча даже десятой части метана из гидратосодержащих залежей может удовлетворять мировые потребности в энергии в течение десятков лет. При этом процесс эксплуатации газогидратных месторождений чреват большими катаклизмами из-за неконтролируемых выбросов газов в атмосферу. В этой связи необходимы совершенствование существующих и разработка новых способов разведки и добычи углеводородных газов с учетом образования или разложения газовых гидратов [8, 9].

В качестве подходов, которые применяются для добычи метана из гидратосодержащего пласта, могут быть отмечены следующие: снижение давления, тепловое воздействие, нагнетание в пористый коллектор диоксида углерода, закачка в пласт ингибиторов, способствующих диссоциации газогидрата [2, 3, 7]. Также стоит отметить, что для разработки эффективного способа определения параметров газогидратных залежей необходимо, в том числе, установление акустических свойств гидратосодержащих пород [10]. Для глубокого понимания влияния свойств пород (пористости, проницаемости, литологического состава, насыщенности углеводородами) на распространение волн в гидратонасыщенном коллекторе, для прогнозирования возможного сценария отбора газа из подземных резервуаров, содержащих гидраты метана, необходимо математическое описание развития процесса [8]. Полученные при таком теоретическом изучении результаты могут существенным образом уменьшить объем необходимых экспериментальных и промысловых данных. При моделировании физических процессов в пористых системах с газовыми гидратами целесообразно использовать уравнения механики многофазных систем [9, 11].

В работе представлены решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, возникающей

при описании многофазного течения в пористой среде, сопровождающегося образованием и разложением газовых гидратов. Проведено исследование распространения волн давления в гидратонасыщенной пористой среде и в цилиндрическом волноводе в пористой среде с гидратосодержащим слоем. Рассмотрены особенности разложения газовых гидратов на составляющие (газ и вода (лед)) при отборе газа из пласта, насыщенного в исходном состоянии метаном и его гидратом.

Список литературы:

1. Demirbas A. Natural gas. Methane gas hydrate. London: Springer, 2010. P. 57–76.
2. Veluswamy H. P., Kumar A., Seo Y., Lee J. D., Linga P. A review of solidified natural gas (SNG) technology for gas storage via clathrate hydrates // Applied Energy. 2018. Vol. 216. P. 262–285.
3. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. М.: Недра, 1974. 208 с.
4. Chatti I., Delahaye A., Fournaison L., Petitot J. P. Benefits and drawbacks of clathrate hydrates: a review of their areas of interest // Energy Conversion and Management. 2005. Vol. 46, No. 9–10. P. 1333–1343.
5. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992. 236 с.
6. Кузнецов Ф. А., Истомин В. А., Родионова Т. В. Газовые гидраты: исторический экскурс, современное состояние, перспективы исследований // Российский химический журнал. 2003. – Т. 47, № 3. С. 5–18.
7. Makogon Y.F. Natural gas hydrates – A promising source of energy // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2010. Vol. 2, Issue 1. P. 49–59.
8. Цыпкин Г.Г. Течения с фазовыми переходами в пористых средах. М.: Физматлит, 2009. 232 с.
9. Шагапов В.Ш., Мусакаев Н.Г. Динамика образования и разложения гидратов в системах добычи, транспортировки и хранения газа. М.: Наука, 2016. 238 с.
10. Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю., Дудко Д.Н. Численное исследование распространения волн в цилиндрическом волноводе в пористой среде с гидратосодержащим слоем // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2018. – Т. 4, № 4. – С. 210–221.
11. Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
(код проекта № 18-29-10023)*

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ НА БАЗЕ ГРАФЕНА ДЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОНИКИ

Дмитриев А.С.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва
111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., 14

В последнее время функциональные энергетические материалы находят все более широкое применение в различных приложениях – от энергетики и электроники до авиационно-космических технологий [1-3]. Одним из самых перспективных материалов при этом являются нанокompозиты и наножидкости на базе графена и его компонент (например, графеновых хлопьев). В данной работе описаны основные характеристики наноматериалов на базе графеновых хлопьев для их использования в солнечной теплоэнергетике и термостабилизации электроники (в качестве термоинтерфейсных материалов, ТИМ) [4-6].

Разработка новых нанокompозитов на основе графеновых компонент позволило использовать такие материалы для существенного улучшения свойств ТИМ, увеличив их теплопроводность до 7-11,5 Вт/м·К, а также повысить термостабильность, адгезию и другие важные параметры. В таких композитах были использованы полученные оригинальным способом графеновые хлопья с толщиной 3,5-5 нм и латеральным размером до 20-30 мкм. Различные варианты добавок в такие композиты, в частности, мезоскопических металлических микросфер, наночастиц BN, Al₂O₃, AlN, показали возможность управления параметрами таких гибридных нанокompозитов в весьма широких пределах. Важно отметить, что и поверхностные свойства таких материалов показали управляемые свойства – смачиваемость, температуру предельного перегрева, критические тепловые потоки на поверхности и варьированность температуры Лейденфроста. Некоторые из исследованных нанокompозитов были использованы для исследования термостабилизации микропроцессоров, показав более высокие характеристики ТИМ в режимах перегрева.

Вторым важным направлением исследований явилась проблема использования наножидкостей в качестве поглотителя солнечного излучения планковского спектра для применения в солнечной тепловой энергетике. Были исследованы наножидкости с различной концентрацией графеновых хлопьев, которые показали высокую степень поглощения солнечного излучения, локальный нагрев наножидкости вблизи графеновых хлопьев и генерацию паровой фазы в виде мелкодисперсных пузырьков пара, в то время как температуры жидкости оставались существенно ниже температуры кипения (в частности, в некоторых экспериментах температуры пара достигала 120-130 °С, а температура жидкости фиксировалась на уровне 43-46 °С). Важно отметить, что при этом наблюдаются новые тепловые и гидродинамические явления, в частности, сильная неравновесность при нагреве графеновых хлопьев (их нагрев идет за счет наноплазменных эффектов), приводя к тому, что отрывной диаметр малых пузырьков пара

существенно меньше, чем диктуемый критерием отрыва в стандартной теории теплообмена при кипении. Как отмечалось выше, температура жидкости при этом значительно ниже, чем температура пара. Помимо указанных, наблюдаются и другие новые теплофизические явления, объяснение которых в настоящее время отсутствует. В частности, для объяснения механизма генерации малых пузырьков нами предложен новый механизм радиационного нагрева жидкости в ближнем электромагнитном флуктуационном поле (температура графеновых нанокompонент, согласно оценкам и данным других исследователей, может достигать нескольких тысяч градусов), который может давать вклад в нагрев жидкости значительно больший, чем обычная теплопроводность твердое тело - жидкость.

Были также проведены исследования скорости генерации пара при нагреве графеновых наножидкостей с потоком уровня «одного солнца» (около 1 кВт/м²), которые выявили новые термогидродинамические явления как в течениях наножидкости с графеновыми нанохлопьями, так и сильную тепловую неравновесность по высоте нагрева, поскольку графеновые хлопья при нагреве имеют тенденцию образовывать тонкую сильно поглощающую пленку вблизи границы раздела жидкость - окружающая среда (воздух). Все указанные явления представляют значительный интерес, как для фундаментальных задач теплофизики, так и для конкретных применений в солнечной тепловой энергетике и создания новых термоинтерфейсных материалов.

*Работа поддержана Российским научным фондом
(грант № 17-19-01757).*

Список литературы:

1. А.С. Дмитриев Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ, 2015. 756 с.
2. P. Zhang, F. Lv. A review of the recent advances in superhydrophobic surfaces and the emerging energy-related applications. Energy, 82, 2015, P. 1068-1087.
3. J. Renteria, D. Nika, A. Balandin. Graphene Thermal Properties: Applications in Thermal Management and Energy Storage. Appl. Sci. 2014, 4, P.525-547. doi: 10.3390/app4040525.
4. A.A. Dmitriev, A.S. Dmitriev, I. Mikhailova. New Nanocomposite Thermal Interface Materials Based on Graphene Flakes, Mesoscopic Microspheres and Polymers. MATEC Web of Conferences. 207, 04002, ICMMPM 2018.
5. S. Alekseev, A. Dmitriev, P. Makarov, I. Mikhailova. Functional energy nanocomposites surfaces based on mesoscopic microspheres, polymers and graphene flakes. J. Phys. Conf. Ser. 891. 012361. 2017.
6. A.S. Dmitriev. Solar heat power engine on the basis of direct conversion of the Planck spectrum of solar radiation with the use of nanofluids. Int. Conf. on Ren. Energy. April 25-27, 2018, P.108.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ГЕНЕРАЦИИ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ В СИЛЬНО НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Зубарев Н.М.^{1,2}, Зубарева О.В.¹, Месяц Г.А.², Садыкова А.Г.¹,
Шарыпов К.А.¹, Шпак В.Г.¹, Шунайлов С.А.¹, Яландин М.И.^{1,2}

¹ Институт электрофизики УрО РАН,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119333, Россия, Москва, Ленинский пр., 53

При высоких значениях напряженности электрического поля энергия направленного движения, приобретаемая свободными электронами в газе, может превышать энергию, отдаваемую в неупругих столкновениях с молекулами газа. Эти электроны начинают непрерывно ускоряться, т.е. становятся убегающими [1]. Значительный интерес к исследованию убегающих электронов (УЭ) во многом обусловлен их значительной ролью в ионизационных процессах, происходящих при импульсном пробое газа на стадии запаздывания пробоя [2].

В однородном поле достаточным условием убегания электронов является превышение его напряженностью E порогового значения E_r , определяемого параметрами газа ($E_r \approx 450$ кВ/см для азота и воздуха при атмосферном давлении). Однако, особенностью лабораторных исследований генерации УЭ зачастую является резкая неоднородность электрического поля в межэлектродном промежутке. Напряженность поля превышает пороговое значение лишь в малой окрестности поверхности катода и возникает дополнительный вопрос о возможности убегания электронов на периферии – в области слабого поля.

Изменение кинетической энергии электрона, эмитированного из прикатодной области и движущегося к аноду вдоль оси Z , можно описать уравнением

$$d\varepsilon/dz = e|E(z)| - F(\varepsilon),$$

где e – элементарный заряд, F – сила трения электрона в газе, описываемая формулой Бете [1]. Особый интерес представляет ситуации, когда оба слагаемых в правой части этого уравнения спадают с расстоянием по одному закону и, как следствие, их влияние является сравнимым вдоль всей траектории УЭ. Как оказывается, такая ситуация реализуется, если поле спадает с расстоянием от кромки катода как $z^{-1/2}$, что соответствует разрядному промежутку «трубчатый кромочный катод – плоский анод».

В настоящей работе теоретически и экспериментально исследуются условия генерации УЭ в газовом диоде с сильно неоднородным полем, убывающем по указанному корневому закону. Как было выявлено в [3], для такого распределения поля удается аналитически решить уравнения движения электронов в газе. Это позволяет сформулировать условия убегания электронов на периферии, в области слабого поля, дополняющие классическое условие убегания $E_0 > E_r$ электрона в прикатодной области (E_0 – напряженность поля на кромке). Новое условие убегания имеет вид, $U \geq \sqrt{2DE_r U^*}$ где D – межэлектродное расстояние, U^* – слабо зависящий от межэлектродного рас-

стояния параметр ($U^* \approx 2.7\text{--}3.0$ кВ для расстояний в диапазоне 6–26 мм). Именно это условие, а не классическое, будет определять переход электронов в режим убегания для сильно заостренной кромки катода. Граничным значением радиуса скругления R кромки катода для использования различных критериев убегания является $R^* = U^*/E_r \approx 60\text{--}67$ мкм (эта оценка соответствует азоту при атмосферном давлении). Результаты наших исследований пороговых условий убегания электронов для $D=7.5$ мм и различных R сведены на рисунке. Между предсказаниями теории [3] и экспериментальными данными [4] имеется явная корреляция.

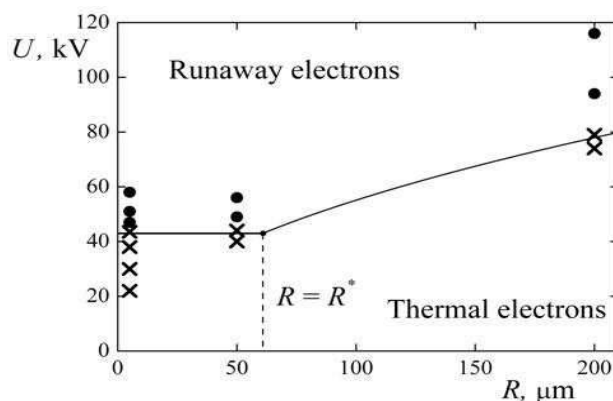


Рис. 1. Круги – наличие УЭ; кресты – отсутствие УЭ для $D=7.5$ мм и $R=5, 50, 200$ мкм. Сплошной линией показана граница между областями параметров, где происходит и где не происходит генерация УЭ (теория).

Список литературы:

1. High-energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases / Babich L.P. Futurepast, Arlington, 2003. 358 p.
2. Mesyats G.A., Yalandin M.I., Reutova A.G., et al. Picosecond Runaway Electron Beams in Air // Plasma Phys. Reports. 2012. V. 38. P. 29–45.
3. Зубарев Н.М., Месяц Г.А., Яландин М.И. Условия убегания электронов в газовом диоде с сильно неоднородным электрическим полем // Письма в ЖЭТФ. Т.105, № 8. С. 515–520.
4. Zubarev N.M., Yalandin M.I., Mesyats G.A., et al. Experimental and theoretical investigations of the conditions for the generation of runaway electrons in a gas diode with a strongly nonuniform electric field // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. art. no 284003.

*Теоретическая часть работы выполнялась при поддержке РФФИ (проект № 17-08-00430) и РАН (Программа президиума РАН № 11).
Экспериментальная часть работы выполнялась при поддержке РФФИ (проекты № 19-08-00292 и 17-08-00608) и РАН (Программа Президиума РАН № 10).*

ТЕПЛОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С НАКЛОНЕННЫМИ ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНЫМИ ВИХРЕГЕНЕРАТОРАМИ

Исаев С.А.

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,
196210, Россия, Санкт-Петербург, ул.Пилотов, 38

Поверхностные вихрегенераторы зарекомендовали себя как эффективные инструменты интенсификации теплообмена [1]. Среди них особый интерес вызывают пакеты лунок-ямок, для которых характерно превышение темпа роста теплоотдачи над увеличением гидравлических потерь. Однако наклоненные овално-траншейные лунки оказались предпочтительными перед сферическими и близкими к симметричным лунками-ямками в качестве эффективных вихревых генераторов. В комплексных исследованиях [2–4] рассматриваются одиночные и периодические, однорядные лунки постоянной площади пятна в узком канале. Здесь они дополняются анализом влияния числа Рейнольдса и глубины лунки. В [5, 6] открыты явления аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклоненных овално-траншейных лунках, а также ускорения ламинарного и турбулентного потоков в ядре канала. Здесь исследуется влияние угла наклона овално-траншейной лунки на предельные характеристики течения и теплообмена в узком обдуваемом канале.

Луночный рельеф набирается из однорядных пакетов лунок, причем шаг между ними определяет плотность их нанесения – σ . Числа Рейнольдса, построенные по среднemasсовой скорости и высоте канала, определяют режим обтекания. Рассматривается периодическая секция узкого канала размером $6 \times 1 \times 7$. Глубина овално-траншейной лунки – 0.3, ширина – 1.05, длина – 7.05, радиус скругления кромки – 0.21, угол наклона – 45. Отмечаются значительные перепады давления между зонами торможения и разрежения. Скорости возвратного течения доходят до 0.7, восходящего и нисходящего потоков до 0.5, а вторичных токов почти до 0.8 от среднemasсовой скорости. Тепловая эффективность 1.69 при гидравлических потерях 1.465. Влияние плотности канавок исследуется при глубинах лунок, равных 0.25. Уплотнение однорядных лунок сопровождается усилением интенсификации отрывного течения и теплообмена. Рассматриваемые $\sigma=0.13; 0.27; 0.40; 0.67$. Обнаружено соответствие максимума относительной теплоотдачи (5.5) и минимума относительного трения (-5). С увеличением σ в рассматриваемом интервале наблюдается рост интенсивности течения и теплообмена более, чем в полтора раза. Тепловая эффективность увеличивается до 81% при росте гидравлических потерь 71%.

Подобно ускорению ламинарного потока в узком канале с наклоненными ОТЛ при уплотнении пакета наклоненных под углом 65 градусов ОТЛ получен эффект ускорения турбулентного потока с увеличением максимальной скорости в ядре потока в 1.39 раза при шаге H между лунками 2.

Уплотнение однорядных лунок значительно усилило аномальную интенсификацию отрывного турбулентного течения и теплообмена во входной части наклоненной под углом 65 градусов ОТЛ на нагретой

стенке периодического модуля узкого канала, которое при $H=2$ характеризуется четырехкратным увеличением максимальной абсолютной величины относительной проекции трения на направление срединного сечения ОТЛ и почти 6.5-кратным ростом относительной теплоотдачи (по отношению к параметрам в плоскопараллельном канале). Максимальная абсолютная величина скорости вторичного (поперечного) течения примерно на 10% превосходит величину максимальной скорости потока в плоскопараллельном канале. Максимальная абсолютная величина скорости рециркуляционного течения почти вдвое превышает аналогичную скорость возвратного течения в сферической лунке, доходя до 0.89 от среднemasсовой скорости в канале.

Причина аномальной интенсификации отрывного турбулентного течения и теплообмена во входной части ОТЛ заключается в растущем с уплотнением лунок гигантском перепаде статического давления между близкими зонами высокого (доходит до величины порядка 0.6) и низкого давления (полученная минимальная величина –0.6), возникающих при торможении входящего в лунку потока на наветренной части кромки и в месте зарождения спиралевидного вихря на входном подветренном сферическом сегменте.

Список литературы:

1. Вихревые технологии для энергетики / А.И. Леонтьев, С.В. Алексеенко, Э.П. Волчков и др.; под общей редакцией академика А.И. Леонтьева. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 350с
2. Isaev S.A., Schelchikov A.V., Leontiev A.I., Gortyshev Yu.F., Baranov P.A., Popov I.A. Tornado-like heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of fixed depth and spot area // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2017. Vol.109. P. 40–62.
3. Isaev S., Leontiev A., Chudnovsky Y., Popov I. Vortex heat transfer enhancement in narrow channels with a single oval-trench dimple oriented at different angles to the flow // J. Enhanced Heat Transfer. 2018. Vol. 25. No.6. P.579–604.
4. Isaev S., Leontiev A., Chudnovsky Y., Nikushchenko D., Popov I. and Sudakov A. Simulation of vortex heat transfer enhancement in the turbulent water flow in the narrow plane-parallel channel with an inclined oval-trench dimple of fixed depth and spot area // Energies 2019. Vol.12.No.7.P.1296. //doi.org/10.3390/en12071296
5. Isaev S.A., Baranov P.A., Leontiev A.I., Popov I.A. Intensification of a laminar flow in a narrow microchannel with single-row inclined oval-trench dimples // Technical Physics Letters. 2018. Vol. 44. No. 5. P. 398–400.
6. Isaev S.A., Leontiev A.I., Milman O.O., Popov I.A., Sudakov A.G. Influence of the depth of single-row oval-trench dimples inclined to laminar air flow on heat transfer enhancement in a narrow microchannel // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 134. P. 338–358.
7. Isaev S., Gritkevich M., Leontiev A., Popov I. Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall // Acta Astronautica. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.01.033>.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ
(грант 17-08-00148)*

ФОРМИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ПОЛЕЙ СОЛЕННОСТИ И ПЛОТНОСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Коротаев Г.К.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Морской гидрофизический институт РАН»,

299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2

В докладе рассматривается роль ячеек циркуляции в вертикальной плоскости при формировании потоков тепла или соли в морских бассейнах. В Мировом океане, ввиду большого перепада температур верхних и глубинных слоев, ячейка циркуляции морской воды в вертикальной плоскости вносит преобладающий вклад в формирование переноса тепла. Как оказывается, в умеренных широтах в океане наблюдается подъем глубинных вод к поверхности [1]. Образование же глубинных вод происходит всего в нескольких районах северной и южной Атлантики. На основании представлений о подъеме глубинных вод в умеренных широтах и их образовании в локализованных приполярных областях, в работе [2] была предложена схема циркуляции глубинных вод, показывающая, что в Атлантическом океане холодная глубинная вода движется на юг, тогда как в Индийском и Тихом океанах она перемещается на север. Соответственно в верхних слоях в Атлантике теплая вода в среднем движется на север, а в Индийском и Тихом океанах – на юг. В целом такое движение формирует глобальную вертикальную ячейку, которая в значительной степени соответствует ячейке Гадлея в атмосфере. В работе [3] было замечено, что такая ячейка циркуляции обеспечивает перенос тепла с юга на север во всей Атлантике, что затем было подтверждено результатами обработки потоков тепла на границе океана и атмосферы [6]. Дальнейшие исследования слегка уточнили схему переноса тепла в Мировом океане, известную сейчас как термический конвейер.

Еще один пример эффективности ячейки в вертикальной плоскости дает Черное море, где она играет определяющую роль в формировании его халинной и плотностной стратификации. В Черном море высоко-солёная и плотная вода образуется вблизи устья пролива Босфор за счет поступления вод Мраморного моря. Распределение вод в поверхностных слоях моря происходит под влиянием речного стока.

Исследование механизма формирования вертикальной ячейки циркуляции вод в Черном море проводилось в работах [4, 5, 6] на основе лабораторного и численного моделирования циркуляции вод в цилиндрическом вращающемся бассейне. Было показано, что потоки плавучести через боковые границы приводят к формированию выраженного пикноклина имеющего структуру пограничного слоя. В продолжении этих исследований в работе [7], где исследовалась временная эволюция халинной стратифика-

ции, было показано, что изменение стратификации во времени происходит в квазистационарном режиме после адаптационного периода, имеющего для Черного моря порядок ста лет.

В докладе, основываясь на результатах работ [6, 7] из анализа размерностей предлагается простая модель развития халинной и плотностной стратификации в цилиндрическом вращающемся бассейне под воздействием потоков плавучести через боковые границы. Предложенная модель дает оценку характерного времени реакции стратификации бассейна на изменение внешних условий, соответствующее результатам численных расчетов [7]. Выполненный анализ показывает также, что характерное время изменения вертикальной ячейки циркуляции, а, следовательно, и вертикальной стратификации Черного моря, определяется инерцией основной толщи вод бассейна. Этот результат имеет значение не только для Черного моря, но и для Мирового океана, поскольку объясняет медленное изменение меридионального переноса тепла даже при значительной вариации условий глубокой конвекции в полярных широтах.

Список литературы:

1. Robinson A.R., Stommel Y. The oceanic thermocline and associated thermohaline circulation // *Tellus*, 1959, Vol. 11 No 3, pp. 295 – 308.
2. Стоммел Г., Аронс А. Абиссальная циркуляция в Мировом океане. Идеализированная модель циркуляции в Мировом океане. Проблемы океанической циркуляции М. Мир 1965 с. 204–252.
3. Stommel H. Assymetry of interoceanic fresh-water and heat fluxes // *Proc/ Natl. Acad. Sci. USA*, 1980, Vol. 77, No 5, pp. 2377–2381.
4. Булгаков С. Н., Коротаев Г. К., Уайтхед Дж. А. Роль потоков плавучести в формировании крупномасштабной циркуляции и стратификации вод моря. Часть 1: Теория // *Известия РАН ФАО*, 1996. Том. 32, № 4, С. 548–556.
5. Булгаков С. Н., Коротаев Г. К., Уайтхед Дж. А. Роль потоков плавучести в формировании крупномасштабной циркуляции и стратификации вод моря. Часть 2: Лабораторные эксперименты // *Известия РАН ФАО*, 1996. Том. 32, № 4 С. 557–564.
6. Whitehead J. A., Korotaev G. K., Bulgakov S. N. Convective circulation in mesoscale abyssal basins // *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics*, 1998, Vol. 89, pp. 169–203.
7. Сендеров М. В., Мизюк А. И. Влияние начальных условий на водообмен через Босфор и формирование вертикальной халинной структуры Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. Севастополь, 2017. Вып. 2. С. 82–89.

Работа поддержана РНФ (грант № 17-77-30001)

МНОГОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЙ И МЕЖФАЗНЫЙ ТЕПЛОМАСООБМЕН ПРИ ФАЗОВЫХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ В МИКРОСТРУКТУРНЫХ СИСТЕМАХ**Кузнецов В.В.**

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

e-mail: vladkuz@itp.nsc.ru

Одним из перспективных направлений развития современных энергетических установок является применение микроструктурных систем, позволяющих значительно повысить их производительность. Отсутствие надежных методов расчета гидродинамики и межфазного теплообмена в таких системах в значительной степени сдерживает разработку энергетических установок для традиционной, водородной и малой распределенной энергетики, что обусловлено слабо изученной взаимосвязью процессов на микро- и макромасштабах [1, 2]. В данной работе рассмотрены результаты физического и математического моделирования многомасштабной структуры течений и межфазного теплообмена при фазовых и химических превращениях в микроструктурных системах двухфазных теплообменных устройств, высокоинтенсивных систем охлаждения, МЭМС на основе управляемого распада жидкости, реакторов-теплообменников водородной энергетики и аппаратов получения синтетического топлива.

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований противоточного газожидкостного течения и межфазного теплообмена в микроструктурных системах теплообменных аппаратов, заполненных насадками различного типа. На основе экспериментальных исследований выявлены закономерности течения жидкости и пара в условиях определяющего влияния капиллярных сил и спонтанной закрутки потока пара, развиты методы математического моделирования процессов межфазного теплообмена, основанные на учете детальной структура потоков жидкости и пара. Установлено, что основной причиной многомасштабной самоорганизации противоточного течения в структурных насадках являются взаимосвязанные гидродинамические и массообменные процессы, приводящие к развитию конвективных течений и капиллярно-гравитационной неустойчивости, что снижает эффективность разделения и вызывает неравномерность потоков жидкости и пара. Разработанные модели хорошо соответствуют экспериментальным данным и закладывают основы обоснованных методов расчета современных ректификационных колонн и градиен.

Рассмотрены методы моделирования процессов теплообмена при спутном газожидкостном течении в пластинчато-ребристых испарителях и конденсаторах воздухоразделительных установок и систем сжижения природного газа. Разработана математическая модель теплообмена, основанная на получении решений для течения жидкости в углах и на стенках каналов с последующей сшивкой решений на линии сопряжения.

Численные расчеты показали, что формирование сухих пятен и увеличение коэффициента теплоотдачи в окрестности контактной линии жидкость-пар-стенка типичны для испарения в двухфазных компактных теплообменниках. Предложенная модель теплообмена хорошо согласуется с известными экспериментальными данными и закладывает основы расчета компактных испарителей и конденсаторов различного применения.

Для создания высокоинтенсивных систем отвода тепла от теплонапряженных зон энергетического оборудования и электронных устройств выявлены физические механизмы и разработан новый метод расчета теплообмена при кипении недогретой и насыщенной воды, а также хладонов, в микроканалах, учитывающий совместно вклад подавления пузырькового кипения, двухфазной конвекции и испарения жидкости в условиях вынужденной конвекции. На основе экспериментальных исследований предложены методы повышения критической тепловой нагрузки для кипения в микроканальных системах охлаждения, выявлены закономерности теплообмена при микроструйном охлаждении зон повышенного тепловыделения.

Экспериментально получены физические закономерности взрывного фазового перехода в микроэлектромеханических системах на основе управляемого распада жидкости в условиях импульсного нагрева, разработан метод расчета самосогласованного роста пузырей пара при взрывном кипении однокомпонентных жидкостей, смесевых композиций и жидкости с наночастицами, направленный на разработку методов управления взрывным фазовым переходом.

Синтезированы многокомпонентные каталитические наноструктуры на основе родия и палладия для проведения паровой и автотермальной конверсии углеводородов и спиртов. Представлены результаты экспериментальных исследований и разработана математическая модель конверсии углеводородов в микроканальном реакторе-теплообменнике, установлена высокая степень конверсии исходных продуктов в синтез-газ и жидкие углеводороды при последующем низкотемпературном синтезе Фишера-Тропша в микроструктурном многофазном реакторе.

Список литературы:

1. Abramson A.R., Tien C.L. Recent Developments in Microscale Thermophysical Engineering // J. Microscale Thermophys. Eng. 1999. 3 (4). С. 229–244.
2. Kuznetsov V.V. Heat and Mass Transfer with Phase Change and Chemical Reactions in Microscale // Proc. Int. Heat Transfer Conf. IHTC14. 2010. Washington, USA. IHTC14–225701.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН за счет грантов Российского Научного Фонда (проект №16-19-10519) и РФФИ (проект №18-08-01282)

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ В РАЗРАБОТКЕ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ И ИСПАРЕНИИ

Павленко А.Н.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В докладе представлен анализ современных методов интенсификации теплообмена и повышения критического теплового потока при кипении и испарении с использованием микро-наноструктурирования теплоотдающей поверхности. Особое внимание уделено анализу таких перспективных способов модифицирования теплоотдающих поверхностей как нанесение комбинированных микроструктурированных поверхностей/покрытий методом SLM/SLS (3-D печать), организация структур с контрастной смачиваемостью на микромасштабе. Представлены выводы и рекомендации, сформулированные на основе обобщения результатов комплексных исследований [1–13] по изучению теплообмена, переходных процессов и кризисных явлений при кипении в условиях свободной конвекции, при испарении и кипении в стекающих пленках и в тонких горизонтальных слоях жидкостей при использовании различных типов микроструктурирования теплоотдающих поверхностей.

В первой части доклада представлены результаты сравнительного анализа по эффективности теплообмена и критическому тепловому потоку при кипении и испарении в пленках жидкости и смесей жидкостей, стекающих по вертикальным цилиндрам с микротекстурой разной формы, с микропрофилированием теплоотдающей поверхности с использованием деформирующего резания, с сетчатыми покрытиями различных форм и размеров [1–3].

Во второй части доклада представлен обзор новых экспериментальных данных по теплообмену и критическому тепловому потоку для различных законов тепловыделения при кипении в условиях свободной конвекции с использованием новых структурированных капиллярно-пористых покрытий, создаваемых методом плазменного напыления [4–6].

В следующей части представлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования повторного смачивания сильно перегретых тел стекающей пленкой жидкости [7, 8]. Проведен анализ результатов по нестационарному теплообмену, динамике развития и структуре фронта повторного смачивания стекающей пленкой жидкости, механизмам резкого увеличения скорости охлаждения вертикально ориентированных пластин с новыми структурированными капиллярно-пористыми или низкотеплопроводными покрытиями в широком диапазоне изменения степени орошения.

В заключительной части представлены особенности теплообмена и развития кризисных явлений при кипении и испарении в тонких горизонтальных слоях жидкости. Показаны принципиально новые результаты по степени интенсификации теплообмена и повышению критического теплового потока на микроструктурированных поверхностях, создаваемых методом 3-D печати. Проведенный анализ показывает,

что оптимальные параметры микроструктурированных капиллярно-пористых покрытий в значительной степени определяются толщиной слоя для заданной жидкости и величиной приведенного давления [9, 10].

Список литературы:

1. Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A. Heat transfer and critical heat flux at evaporation and boiling in refrigerant mixture films falling down the tube with structured surfaces// Intern. J. Heat Mass Transfer. 2015. Vol. 90. P. 149–158.
2. Теплообмен и кризисные явления в стекающих пленках жидкости при испарении и кипении / А.Н. Павленко, Н.И. Печеркин, О.А. Володин; под ред. В.Е. Накорякова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 196 с.
3. Volodin O.A., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Zubkov N.N. Heat transfer and crisis phenomena at boiling of refrigerant films falling down the surfaces obtained by deformational cutting// Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2017. Vol. 5. No. 3. P. 215–222.
4. Surtaev A.S., Pavlenko A.N., Kuznetsov D.V., Kalita V.I. et al. Heat transfer and crisis phenomena at pool boiling of liquid nitrogen on the surfaces with capillary-porous coatings// Intern. J. Heat Mass Transfer. 2017. Vol. 108. P. 146–155.
5. Surtaev A.S., Kuznetsov D.V., Serdyukov V.S., Pavlenko A.N., Kalita V.I. et al. Structured capillary-porous coatings for enhancement of heat transfer at pool boiling// Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 133. P. 532–542.
6. Pavlenko A.N., Kuznetsov D.V., Surtaev A.S. Experimental study of the influence of structured capillary-porous coatings on the dynamics of development of transient processes and the crisis phenomena at stepwise heat release// Journal of Engineering Thermophysics. 2018. Vol. 27. No. 3. P. 285–293.
7. Павленко А.Н., Цой А.Н., Суртаев А.С., Кузнецов Д.В., Сердюков В.С. Влияние низкотеплопроводного покрытия на динамику повторного смачивания перегретой пластины стекающей пленкой жидкости// ТБТ. 2016. Т. 54. № 3. С. 393–400.
8. Павленко А.Н., Цой А.Н., Суртаев А.С., Кузнецов Д.В., Калита В.И., Комлев Д.И., Иванников А.Ю., Радюк А.А. Экспериментальное исследование повторного смачивания перегретой пластины со структурированным капиллярно-пористым покрытием стекающей пленкой жидкости// ТБТ. 2018. Т. 56. № 3. С. 424–430.
9. Zhukov V.I., Pavlenko A.N. Heat transfer and critical phenomena during evaporation and boiling in a thin horizontal liquid layer at low pressures// Intern. J. Heat Mass Transfer. 2018. Vol. 117. P. 978–990.
10. Zhukov V.I., Pavlenko A.N., Bessmeltsev V.P. Heat transfer at evaporation and boiling in thin horizontal liquid layers on smooth and micro-structured surfaces under low pressures // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1105. No. 012054. 5 P.
11. Суртаев А.С., Сердюков В.С., Павленко А.Н. Нанотехнологии в теплофизике: теплообмен и кризисные явления при кипении// Российские Нанотехнологии. 2016. Т. 11. № 11–12. С. 1–15.
12. Жуков В.Е., Павленко А.Н., Моисеев М.И., Кузнецов Д.В. Динамика межфазной поверхности самоподдерживающегося фронта испарения в жидкости с добавками наноразмерных частиц// ТБТ. 2017. Т. 55. № 1. С. 85–93.
13. Surtaev A.S., Serdyukov V.S., Pavlenko A.N., Kozlov D.V., Selishchev D.S. Characteristics of boiling heat transfer on hydrophilic surface with SiO₂ coating// Bulgarian Chemical Communications. 2018. Vol. 50. Special Issue K. P. 36–44.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН
за счет гранта Российского научного фонда
(проект № 19-19-00180)



СЕКЦИЯ 1

Теплообмен и гидродинамика в однофазных средах



МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ В КАНАЛАХ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Беляев И.А.¹, Генин Л.Г.², Пятницкая Н.Ю.^{1,2}, Разуванов Н.Г.¹, Свиридов В.Г.^{1,2}

¹Объединённый институт высоких температур РАН,
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14

²Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2

Жидкие металлы (ЖМ) являются перспективными теплоносителями в ядерной и термоядерной энергетике. Для осуществления такого проекта охлаждения необходимы масштабные исследования теплообмена и гидродинамики течения в каналах в условиях, приближенные к реальным. Такими условиями в первую очередь являются: течение электропроводной жидкости в магнитном поле (МП) и термогравитационная конвекция, формируемая за счет сильных тепловых потоков. В последнее время в научной группе теплофизиков МЭИ-ОИВТ РАН, получение экспериментальных данных стало возможным благодаря созданию модельных установок направленных на выявление закономерностей МГД-течения. Предметом исследования являются различные конфигурации охлаждения перспективных термоядерных установок, таких как ИТЭР [1] и т.д. В работе представлены зондовые методы и датчики, которые использовались в экспериментальных исследованиях МГД-течения и теплообмена ЖМ, проводимых на базе НОЦ НИУ «МЭИ» – ОИВТ РАН.

Методика проведения эксперимента

Локальные измерения в среде ЖМ представляют непростую задачу – приходится преодолевать ряд трудностей [2]. При выборе метода измерений надо учитывать следующие особенности ЖМ: плотные среды; электропроводные среды; высокие температуры плавления у большинства; агрессивные или токсичные среды; наличие окислов и загрязнений; растворяют другие металлы; наличие «переднего следа» при обтекании потоком зонда в МП. Методы, широко используемых для локальных измерений теплофизических величин в неэлектропроводных жидкостях и газах, часто в потоках ЖМ неприменимы, либо требуют модификации.

1. **Зондовая методика.** При исследованиях гидродинамики и теплообмена большое значение имеет способ введения датчиков скорости и температуры в поток ЖМ. Измерение температуры в потоке непрозрачной жидкости можно проводить с помощью закладки термопар в стенку, однако тогда, удастся получить только ограниченную информацию о течении. Помимо этого, внедрение термопар и других датчиков в стенку могут сильно искажать результаты. В таких задачах зондовая методика измерений предпочтительней других.

2. **Датчики.** Рассмотрим возможные методы измерения применительно к нашим исследованиям течения ЖМ в трубе в условиях обогрева и МП.

Традиционный метод, который может быть использован для измерения скорости – трубка Пито. Однако существует ряд недостатков, который делает этот метод менее востребованным, например, датчик (капилляр) не удастся сделать миниатюрным, диаметром менее 0.3÷0.5 мм. Несмотря на недостатки, удалось получить удовлетворительные результаты при течении ЖМ в трубе, используя этот метод [3]. Наиболее часто используемой является корреляционная и кондукционная методика.

Не менее важной задачей является измерение температурных характеристик, таких как профили температуры и интенсивности температурных пульсаций, осциллограммы и др. в потоке ЖМ используются микротермопары. Анализ эволюции профилей интенсивности температурных пульсаций позволяет оценить изменение структуры потока, например, при наложении МП. Пример проводимых измерений представлен на рис. 1.

По мнению авторов, зондовая методика в комбинации с различными датчиками позволяет получить полную информацию о структуре потока жидкости в каналах различной формы.

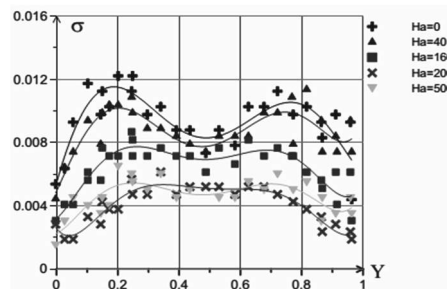


Рис. 1. Профиль интенсивности температурных пульсаций в поперечном сечении канала. $Gr_q = 1.1 \cdot 10^8 Re = 2 \cdot 10^4$.

Список литературы:

1. Buoyancy effects in vertical rectangular duct with coplanar magnetic field and single sided heat load—Downward and upward flow / I.R.Kirillov, D.M.Obukhov, V.G.Sviridov, et. al / Fusion Engineering and Design. – 2018. – Т. 127. – С. 226–233.
2. Свиридов В.Г. Исследование гидродинамики и теплообмена в каналах применительно к проблеме создания термоядерного энергетического реактора // Диссертация д.т.н. 1989. Москва. 438 с.
3. Жилин. В.Г. Влияние продольного магнитного поля на профиль скорости при турбулентном течении в трубе. ТВТ, 1968, № 4, с.756–758.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант РФФ № 17-19-01745)

ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРЕМЕННОЙ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАМКНУТОГО РАДИАТОРА, ЗАПОЛНЕННОГО ПАРАФИНОМ С НАНОЧАСТИЦАМИ

Бондарева Н.С., Шеремет М.А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

Необходимость создания новых высокоэффективных систем пассивного охлаждения связана с развитием электронной техники и мобильных гаджетов, размеры которых уменьшаются, а мощность постоянно растет. Одним из направлений развития таких систем является использование парафинов с температурой плавления, не превышающей критическую температуру работы устройства. При достижении точки плавления повышается интенсивность охлаждения за счет интенсивного поглощения энергии на подвижной межфазной границе. Особенностью парафинов является относительно невысокая теплопроводность ($0,14 - 0,5 \text{ Дж/г}\cdot\text{К}$) [1], поэтому для интенсификации процессов теплопереноса в материал могут быть включены наночастицы высокой теплопроводности. С увеличением доли наночастиц увеличивается теплопроводность материала [2]. С увеличением массовой доли наночастиц до 10% время плавления сокращается на 27%, в то же самое время снижается эффективная теплоемкость материала [3]. Также следует отметить влияние наночастиц на вязкость расплава [4, 5]. Добавление наночастиц изменяет свойства материала: наряду с повышением теплопроводности наблюдается значительное повышение вязкости расплава, меняется гидродинамика конвективных течений.

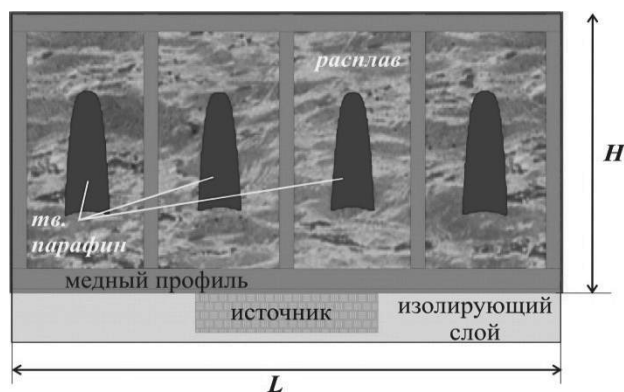


Рис. 1. Область решения

В данной работе рассматривается сопряженная задача естественной конвекции с учетом фазовых переходов внутри замкнутого радиатора, нагреваемого от источника нестационарного объемного тепловыделения. В качестве парафина используется н-октадекан с температурой плавления $28,05^\circ\text{C}$. На боковых границах и верхней стенке было поставлено условие конвективного охлаждения, остальные границы системы считались теплоизолированными. В момент времени $t=0$ температура во всей системе совпадала с температурой окружающей среды, пара-

фин находился в твердом состоянии. Расплав считался вязкой несжимаемой жидкостью, а течение, возникающее в расплаве, ламинарным. Свойства материала рассматривались постоянными в пределах одной фазы и не зависящими от температуры. Для описания свойств материала, усиленного наночастицами, использовалась однофазная модель. Модель, описывающая процессы теплопереноса внутри парафина, была сформулирована в преобразованных переменных функция тока, завихренность и температуры и решена с использованием метода конечных разностей. Для формулировки и решения уравнения энергии между расплавом и твердым материалом был введен пористый слой со сглаженным переходом теплофизических свойств и функции энтальпии. Гидродинамические уравнения решались в области расплава с применением приближения Буссинеска. На границах между материалами задавались условия равенства тепловых потоков, для описания теплообмена с окружающей средой применялся критерий Био.

Решение нестационарной задачи позволило получить локальные характеристики теплопереноса в системе и зависимость интегральной теплоотдачи и средней температуры источника от времени. На основе полученных данных был проведен подробный анализ влияния концентрации наночастиц на режимы теплопереноса при нестационарном тепловыделении.

Список литературы:

1. Khan Z., Khan Z., Ghafoor A. A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility// *Energy Convers. Manag.* 2016. Vol. 115. Pp. 132–158.
2. Motahar S., Nikkamb N., Alemrajabi A.A., Khodabandeh R., Toprak M.S., Muhammed M. Experimental investigation on thermal and rheological properties of n-octadecane with dispersed TiO_2 nanoparticles// *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 59. Pp. 68–74.
3. Nourani M., Hamdami N., Keramat J., Moheb A., Shahedi M. Thermal behavior of paraffin-nano- Al_2O_3 stabilized by sodium stearoyl lactylate as a stable phase change material with high thermal conductivity// *Renewable Energy*. 2016. Vol. 88. Pp. 474–482.
4. Ho C.J., Gao J.Y. Preparation and thermophysical properties of nanoparticle-in-paraffin emulsion as phase change material// *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2009. Vol. 36. Pp. 467–470.
5. Motahar S., Nikkam N., Alemrajabi A.A., Khodabandeh R., Toprak M.S., Muhammed M. A novel phase change material containing mesoporous silica nanoparticles for thermal storage: A study on thermal conductivity and viscosity// *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 56. Pp. 114–120.

Исследование выполнено при финансовой поддержке
РФФИ и Томской области в рамках научного
проекта № 19-41-703034

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ В БЕЗЫНДУКЦИОННОМ ПРИБЛИЖЕНИИ ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Виноградов Д.А., Тепляков И.О., Ивочкин Ю.П.

Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Россия, Москва, Красноказарменная, 17А

Численно исследована структура течений в полусферическом контейнере при влиянии внешнего осевого магнитного поля, которое приводит к образованию восходящего вихря. Получена зависимость суммарной кинетической энергии в контейнере от внешнего МП.

При пропускании электрического тока через объем жидкого металла возникает объемная вихревая сила $\mathbf{F}=\mathbf{J}\times\mathbf{B}$ (здесь, $\mathbf{J}$ и $\mathbf{B}$ – плотность электрического тока и магнитная индукция созданного им поля), приводящая в случае пространственно неоднородного распределения $\mathbf{J}$ к образованию т.н. электровихревого течения (ЭВТ) [1]. В полусферической системе с центральным электродом, без внешних магнитных полей, ЭВТ имеет форму тороидального вихря, см. рис. 1а. Внешнее осевое магнитное поле приводит к азимутальной закрутке течения (рис. 1б), при этом возникает вихрь направленный противоположно основному течению (рис. 1в, 1г) [2–4].

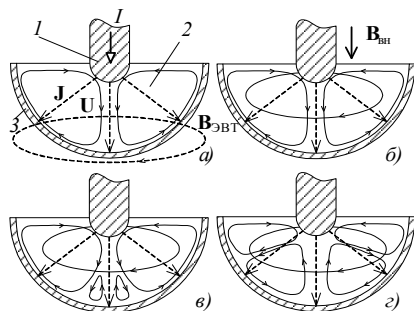


Рис. 1. Структура ЭВТ под действием внешнего осевого магнитного поля. 1 – малый электрод, 2 – жидкий металл, 3 – контейнер-электрод. а) ЭВТ имеет вид тора, б) появление азимутальной закрутки, в) возникновение вторичного вихря, г) двухвихревое вращающееся ЭВТ

Цель данной работы – расчет режимов ЭВТ при электрических токах 100, 400, 600 и 800А в диапазоне внешних магнитных полей от 5×10^{-5} до 1 Тл. Численные расчеты проводились методом контрольного объема на неструктурированной сетке, решалось нестационарное уравнение движения при использовании k- ω SST модели турбулентности в безындукционном приближении [5]. Запишем уравнение движения:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U}\nabla)\mathbf{U} \right) = -\nabla p + \rho \nu \Delta \mathbf{U} + \mathbf{F}_{\text{БИ}}$$

здесь $\mathbf{U}$ – скорость жидкого металла, ρ – плотность жидкости, ν – кинематическая вязкость, p – давление, а $\mathbf{F}_{\text{БИ}}$ – сила в безындукционном приближении.

При этом:

$\mathbf{F}_{\text{БИ}} = (\mathbf{J} + \sigma \mathbf{U} \times (\mathbf{B}_{\text{ЭВТ}} + \mathbf{B}_{\text{внеш.}})) \times (\mathbf{B}_{\text{ЭВТ}} + \mathbf{B}_{\text{внеш.}})$
тут $\mathbf{J}$ – плотность тока проводимости, $\mathbf{B}_{\text{ЭВТ}}$ – собственное магнитное поле, $\mathbf{B}_{\text{внеш.}}$ – внешнее осевое магнитное поле ($\mathbf{B}_{\text{внеш.}} = B_z$).

Плотность тока проводимости и собственное МП находились аналитически и имеют одну не нулевую компоненту в сферической системе координат:

$$J_R = \frac{I}{2\pi R^2}, \quad B_{\text{ЭВТ}\phi} = \frac{\mu_0 I (1 - \cos \theta)}{2\pi R \sin \theta},$$

далее выражения для плотности тока проводимости и собственного магнитного поля переводились в цилиндрическую систему координат и подставлялись в выражение для $\mathbf{F}_{\text{БИ}}$.

На рис. 2. представлена зависимость суммарной кинетической энергии в объеме жидкого металла от величины внешнего МП. При электрическом токе 100А при МП 5×10^{-5} Тл имеет место двухвихревая система ЭВТ, кинетическая энергия возрастает и при МП 8×10^{-3} Тл достигает максимума, а затем уменьшается, подавляемая внешним МП. При электрических токах 400, 600 и 800А в области малых внешних МП (до 2×10^{-4} Тл) ЭВТ имеет вид одиночного тороидального вихря, при росте внешнего МП ЭВТ переходит в двухвихревую систему (кинетическая энергия уменьшается и достигает минимума когда образуется второй вихрь), далее кинетическая энергия начинает возрастать, отметим, что с ростом электрического тока максимум кинетической энергии смещается в область больших внешних МП.

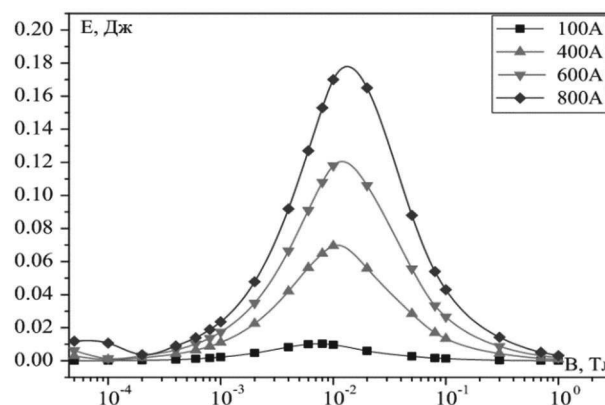


Рис. 2. Зависимость суммарной кинетической энергии в контейнере от внешнего МП.

Список литературы:

1. Бояревич В.В., Фрейберг Я. Ж., Шилова Е. И., Щербинин Э. В. Электровихревые течения. Рига: Зинатне, 1985. 315 с.
2. В.Г.Жилин, Ю.П. Ивочкин, И.О. Тепляков. К вопросу о закрутке осесимметричных электровихревых течений. // Теплофизика высоких температур 2011. №6. с. 957–959.
3. В.Г. Жилин, Ю.П. Ивочкин, В.С. Игумнов, А.А. Оксман. Экспериментальное исследование электровихревых течений в полусферическом объеме // ТВТ. 1995. Т. 33. № 1. С. 490–491.
4. Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О., Гусева А.А. Численное и экспериментальное исследование структуры закрученного электровихревого течения // ТПТ. 2012. № 8. С. 5–11.
5. Teplyakov I., Vinogradov D., Ivochkin Yu, Kharicha A, Serbin P. Applicability of different MHD approximations in electrovortex flow simulation // Magnetohydrodynamics 2018 54. No. 4. p 403–416.

Работа поддержана грантом РФФ № 17-19-01745

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГОСТИ СТОРОК НА ТЕЧЕНИЕ В ВЕНОЗНОМ КЛАПАНЕ

Гатаулин Я.А.^{1,2}, Юхнев А.Д.^{1,2}, Смирнов С.И.¹, Росуховский Д.А.²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

² Институт экспериментальной медицины,
197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Академика Павлова, 12

Изучение венозной гемодинамики продиктовано необходимостью совершенствования методов диагностики и лечения заболеваний вен и угрожающих жизни тромботических осложнений [1-4]. Во всех известных авторам работах, посвященных численному моделированию течений в венозных клапанах, не проводится анализа застойных областей за клапаном, которые являются местами образования тромбов [5, 6]. Известно, что с возрастом створки венозного клапана становятся более жесткими, тем самым препятствуя нормальной работе клапана. С помощью численного моделирования можно получить достаточно большое количество информации о течении в венозном клапане и установить влияние упругости створок на застойные области за клапаном. Целью настоящей работы является исследование влияния упругости створок венозного клапана на формирование застойных областей.

В настоящей работе исследована двумерная симметричная модель несостоятельного клапана подколенной вены, построенная по данным собственных клинических ультразвуковых измерений. Радиус вены $R = 5$ мм, толщина створки составляет $h = 0.4$ мм. Длина створки (L) в результате несостоятельности клапана укорочена и равна радиусу вены. На входной границе задавалось изменение среднерасходной скорости во времени цикла, полученное из доплеровских измерений, на выходной – постоянный уровень давления. Максимальная скорость за цикл равна $V_{b\max} = 0.07$ м/с, длительность цикла $T = 1.7$ с. Для жидкости выбрана ньютоновская модель с плотностью $\rho_f = 1000$ кг/м³ и динамическим коэффициентом вязкости $\mu_f = 0.004$ Па·с. Число Рейнольдса $Re = \rho_f V_{b\max} R / \mu_f \approx 90$, число Уомерсли $Wo = R \sqrt{2\pi r_f / T \mu_f} \approx 5$. Течение является ламинарным. Использовано приближение жестких стенок ввиду малости их перемещений для подколенной вены. Механические свойства створки клапана: $\nu = 0.3$, $E = 0.2-2$ МПа, $\rho_s = 1200$ кг/м³ [4].

Проведен расчет течения жидкости с помощью технологии fluid-structure interaction (FSI), которая реализована в виде совместного решения уравнений жидкости (Навье-Стокса) и твердого тела (створок клапана) с помощью лагранжево-эйлеровского подхода. Гидродинамические расчеты выполнялись в программном комплексе Ansys Fluent, механические – в Ansys Mechanical.

Застойная область наблюдается в синусе (расширении за клапаном), в ней жидкость вращается с относительно небольшой скоростью, причем размер вихря и положение его центра изменяется в течение цикла. Между створками формируется интенсивная струя. Характерно наличие двух максимумов скоро-

сти на оси струи: первый – между створками, второй – между вихрями.

Сопоставление результатов расчетов с клиническими данными проводилось по изменению положения створок венозного клапана во времени цикла (рис. 1). С увеличением упругости створок растет амплитуда их колебаний и становится меньше размер застойной области за створками клапана.

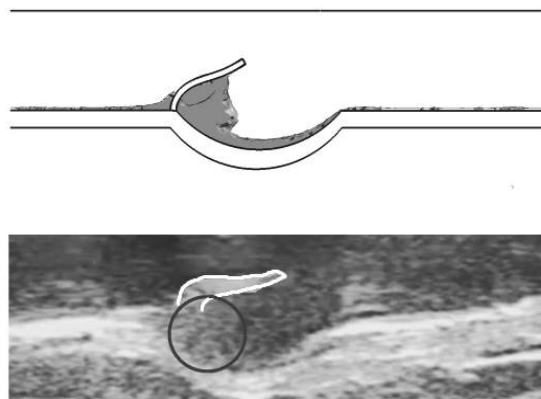


Рис. 1. Сравнение расчетных и зарегистрированных положений створок и застойной области в венозном клапане в момент максимального открытия. Расчетная застойная область выделена серым цветом. На ультразвуковом изображении белой линией отмечены границы створки, застойная зона снизу под основанием створки – серого цвета – обведена в круг.

Список литературы:

1. Lurie F., Kistner R.L., Eklof B., Kessler D. Mechanism of venous valve closure and role of the valve in circulation: a new concept // Journal of Vascular Surgery. 2003. V. 38. P. 955–961.
2. Soifer E., Weiss D., Marom G., Einav S. The effect of pathologic venous valve on neighboring valves: fluid-structure interactions modeling // Med Biol Eng Comput. 2017. V. 55, No. 6. P. 991–999.
3. Wijeratne N.S., Hoo K.A. Numerical studies on the hemodynamics in the human vein and venous valve // American control conference, Washington. 2008. P. 1–6.
4. Simão M., Ferreira J.M., Mora-Rodriguez J., Ramos H.M. Identification of DVT diseases using numerical simulations // Med Biol Eng Comput. 2016. V. 54, No. 10. P. 1591–1609.
5. Ragg J.C. Stationary blood particle aggregates and vein valve shape: a new classification of vein damage // Journal of Vascular Surgery: Venous and Lymphatic Disorders. 2019. V. 7, No. 2. P. 294–295.
6. Lattimer C.R., Azzam M., Papaconstandinou J.A., Villasin M., Ash S., Kalodiki E. Neuromuscular electrical stimulation reduces sludge in the popliteal vein // Journal of Vascular Surgery: Venous and Lymphatic Disorders. 2018. V. 6, No. 2. P. 154–162.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Минобрнауки России в рамках госзадания
«Гемодинамические реакции при сложных
постуральных воздействиях и при тромбозах
артериальных и венозных сосудов»*

О ЯВЛЕНИИ БИЦИКЛОНА В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ИНДУКЦИОННОМ РАЗРЯДЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Герасимов А.В., Кирпичников А.П., Сабирова Ф.Р.

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
420015, Россия, Казань, ул. Карла Маркса, 68

В цикле работ [1–3], посвящённых особенностям теплообмена и газодинамики высокочастотной индукционной плазмы, в рамках классической теплофизики был получен ряд результатов, касающихся газодинамической структуры высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда при атмосферном давлении. В работе [1] введено понятие неподвижной точки ВЧИ разряда, в которой все три компонента скорости плазмобразующего газа обращаются в нуль, и показано, что она соответствует точке на оси плазмоида, в которой значение его осевой температуры максимально. В работе [3] установлено, что внутри плазмоида ВЧИ разряда при атмосферном давлении области прямого и возвратного течений разделяет некоторая поверхность вращения, представляющая собой геометрическое место точек, в которых температура разряда максимальна при каждом фиксированном значении радиальной координаты r . Таким образом, неподвижная точка высокочастотного индукционного разряда может рассматриваться как частный случай более общего физического явления — поверхности с нулевой осевой скоростью, разделяющей прямое и возвратное течения в газоразрядной камере ВЧИ плазмотрона. Наличие неподвижной точки, лобового и кормового вихрей в разрядной камере ВЧИ плазмотрона подтверждается как результатами численных расчетов, так и соответствующими экспериментальными данными других авторов.

В работе [3] высказано также предположение о том, что установленное явление должно быть свойственно более широкому кругу объектов, имеющих внутренний источник тепла, ограниченный по продольной координате.

В работе [4] это явление рассмотрено как свойственное достаточно широкому классу течений в цилиндрических каналах при наличии внутри этих каналов одной или нескольких зон прогрева (внутренней или внешней), ограниченных по продольной координате.

Проведен анализ уравнения баланса энергии вязкого ламинарного течения жидкости или газа внутри цилиндрического канала в области (зоне) прогрева, ограниченной по продольной координате. Установлено, что при ламинарном течении жидкости или газа внутри круглой трубы в каждой зоне прогрева, ограниченной по продольной координате, существуют области прямого и возвратного течений, разделяемые плоскостью, представляющей собой геометрическое место точек, в которых температура максимальна для каждого фиксированного значения радиальной координаты r . Полученные результаты также объясняют возникновение возвратных течений в плазме высокочастотного индукционного разряда атмосферного давления.

Представлена кинематическая схема такого течения. Следует отметить, что близкие результаты были в последнее время получены в цикле работ [5–7]. В этих ра-

ботах рассмотрены положения о формировании, развитии и свойствах конвективных кумулятивно-диссипативных структур. При этом было показано, что при достижении запасённой в конвективной среде энергии некоторого критического значения в этой среде формируются топологически сложные 3D кумулятивно-диссипативные структуры с синергетически сопряженными противоположно направленными конвективными вращающимися энергомассовоимпульсными потоками с различающимися фазовыми состояниями, в частности, в тропических циклонах, с парами и без паров воды.

Таким образом, полученный ранее в работе [4] результат, можно сформулировать ещё и следующим образом. Внутри высокочастотного индукционного разряда, горящего на воздухе при атмосферном давлении, формируется устойчивый бициклон, который вследствие двух вращающихся в противоположных направлениях энергомассовоимпульсных потоков обеспечивает зону пониженного давления в центре плазмоида. При этом наличие устойчивого бициклона приводит к конвективной сепарации свойств среды, в которой этот бициклон существует, и тем самым, является решающим фактором существования устойчивого высокочастотного индукционного разряда, горящего в потоке плазмобразующего газа в стволе цилиндрического канала при атмосферном давлении.

Список литературы:

1. Герасимов А.В., Кирпичников А.П. Неподвижная точка высокочастотного индукционного разряда // ТВТ. 1999. Т. 37, № 3. С. 504–505.
2. Герасимов А.В., Кирпичников А.П. Влияние профиля осевой температуры на профиль осевой скорости в высокочастотном индукционном разряде // Прикладная физика. 2003. Т. 39, № 3. С. 671–675.
3. Герасимов А.В., Кирпичников А.П. Поверхность раздела прямого и возвратного течений в высокочастотном индукционном разряде // Докл. РАН. 2003. Т. 389, № 2. С. 177–179.
4. Герасимов А.В., Кирпичников А.П. О газодинамике и теплообмене течений в цилиндрических каналах при наличии источников тепла, ограниченных по продольной координате // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 4. С. 439–443.
5. Vysikaylo P.I., Cumulative point – L1 between two positively charged plasma structures (3-D strata) // IEEE Transaction on plasma science. 2004. V. 42. N 12. P. 3931–3935.
6. Vysikaylo P.I., Points, lines and surfaces of Vysikailo–Euler libration (cumulation) in nonuniform structures in plasma with current, in Proc. 37th Int. Conf. Phys. Plasma CTNF, Zvenigorod, Russia, 2010. P. 311.
7. Vysikaylo P.I., Detailed elaboration and general model of the electron treatment of surfaces of charged plasmoids (from atomic nuclei to white dwarves, neutron stars, and galactic cores): Self-condensation (self-constriction) and classification of charged plasma structures – Plasmoids part 1. General analysis of the convective cumulatedissipative processes caused by the violation of neutrality: Metastable charged plasmoids and plasma lenses, // Surf. Eng. Appl. Electrochem. 2012. V. 48. No. 1. P. 11–21.

СЛОЖНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ЗАМКНУТОЙ КВАДРАТНОЙ ПОЛОСТИ С ЛОКАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ

Гибанов Н.С., Шеремет М.А.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

Развитие области радиоэлектронной аппаратуры достигло воистину широких масштабов. Непрерывно растет количество новых аппаратов, особенность их работы также перманентно изменяется. Однако любой из ключевых элементов имеет свои циклы/такты работы и простоя. Например, центральный процессор электронного прибора работает, и как следствие потребляет энергию, в результате чего выделяет тепло, только при поступлении сигнала к обработке каких-либо данных. Можно сделать вывод что все ключевые элементы работают периодически, не постоянно, а с некоторым перерывом. Этот факт важно учитывать при подробном расчете распространения тепловых полей в исследуемых областях. Однако это не единственный фактор, который нужно учитывать. Необходимо помнить о важности конвективного и радиационного переноса в полости. Также важную роль играет теплопроводность внутри источника и стенок. Таким образом, для того чтобы разработать наиболее эффективную систему охлаждения электронной техники, необходимо учитывать целый спектр параметров.

В представленной работе численно исследуются сопряженные конвективно-радиационные режимы теплопередачи внутри замкнутого контура с локальным источником объемного тепловыделения. В процессе исследования задачи, учитывается циклический характер тепловыделения с поверхности нагревателя, тем самым проводится моделирование переменной работы центрального процессора.

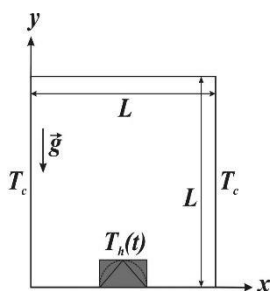


Рисунок 1. Область исследования.

На рисунке 1 схематически представлена расчетная область. Левая и правая стенки контура изотермические и поддерживаются при постоянной минимальной температуре. Верхняя и нижняя стенки не участвуют в теплообмене. Внутри полости, в центре нижней стенки расположен локальный источник объемного тепловыделения. Интенсивность теплообмена внутри источника описывалась по специальному закону, отражающему периодический характер работы нагревателя. Внутри полости находился воздух, считающийся несжимаемой ньютоновской жидкостью, удовлетворяющей приближению Буссинеска.

Уравнения, описывающие сложный теплообмен в исследуемой полости, представляют собой безразмерную систему Обербека-Буссинеска в преобразо-

ванных переменных «функция тока – завихренность – температура» [1, 2]:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \Omega}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) + \frac{\partial \Theta}{\partial X}$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -\Omega$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \Theta}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \frac{1}{\sqrt{\text{Pr} \cdot \text{Ra}}} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} \right)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{a_w / a_f}{\sqrt{\text{Pr} \cdot \text{Ra}}} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} + O_s \right)$$

$$Q_{rad} = R_k - \sum_{i=1}^N F_{k-i} R_i$$

$$R_k = (1 - \varepsilon_k) \sum_{i=1}^N F_{k-i} R_i + \varepsilon_k (1 - \zeta)^4 \left(\Theta_k + 0.5 \frac{1 + \zeta}{1 - \zeta} \right)^4$$

Здесь X, Y – безразмерные координаты, τ – безразмерное время, Ψ – безразмерная функция тока, Ω – безразмерный аналог завихренности скорости, Θ – безразмерная температура, $\text{Pr} = \nu / a$ – число Прандтля; $\text{Ra} = g\beta(T_h - T_c)L^3 / \nu a$ – число Рэлея; a – коэффициент температуропроводности среды; ν – коэффициент кинематической вязкости среды. Q_{rad} – плотность радиационного потока. R_k – плотность потока эффективного излучения.

В качестве расчетного метода был выбран метод конечных разностей. Все расчеты проводились на структурированной сетке. Перед выполнением численных исследований был проведен тщательный анализ разработанной численной методики на тестовых классических задачах, кроме того проведена оценка влияния сеточных параметров на результаты расчета.

В результате проведенных исследований были получены распределения локальных и интегральных параметров. Проведена оценка влияния числа Рэлея, излучательных и поглощательных способностей поверхностей, влияние фактора нестационарности и длительности активного цикла работы нагревателя и интенсивность теплового потока на его поверхности. Проварьирована форма нагревателя.

Список литературы:

1. Шеремет М.А. Сопряженные задачи естественной конвекции. Замкнутые области с локальными источниками тепловыделения. / Берлин: Lamdert Academic Publishing, 2011. 176 с.
2. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Об одном подходе к математическому моделированию тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры и электронной техники // Микроэлектроника. 2008. Т. 37. № 2 С. 150–158.

Работа выполнена в рамках реализации проекта Российского научного фонда (соглашение № 17-79-20141)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И СТРАТИФИКАЦИИ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПО СХЕМЕ КАБАРЕ

Глотов В.Ю., Головизнин В.М., Канаев А.А., Кондаков В.Г., Киселев А.Е.

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва
115191, г. Москва, Большая Тульская ул., д.52

Известно, что во время тяжелой аварии с потерей теплоносителя в атмосферу защитной оболочки (ЗО) водо-водяного реактора (типа ВВЭР) может поступать большое количество горячего пара и водорода. Возникает опасность стратификации газа и образования детонационных смесей под ЗО. Для обеспечения водородной безопасности (ВБ) на АЭС необходима комплексная система мер (технических, нормативных, организационных), направленных на эшелонированную защиту технологических систем и персонала. Разработка таких мер должна основываться на результатах расчетно-теоретического анализа постулируемых сценариев аварий и результатах натурных (и модельных) экспериментальных исследований, предназначенных для верификации физико-математических моделей расчетных кодов.

Для этих целей за рубежом проводятся систематические исследования по вопросам стратификации водорода в ЗО (проекты OECD/NEA: SETH, SETH-2, ERCOSAM-SAMARA, HYMERES, HYMERES-2). Исследования ведутся от простого к сложному. Изучаются как базовые механизмы формирования и разрушения стратификации легкого газа, так и условия в реалистичной постановке с учетом одновременной работы нескольких систем безопасности. Все эксперименты сопровождаются расчетно-аналитическими исследованиями.

В ИБРАЭ РАН для численного моделирования задач анализа ВБ разрабатывается программное средство на основе инновационных подходов к построению детальных многомерных и мультифизичных моделей переноса и формирования пространственного распределения пожаро-взрывоопасных концентраций. В её основе лежит известная методика КАБАРЕ [1], которая в отличие от полуэмпирических подходов, используемых в современных инженерных кодах, не имеет настроечных параметров, и, в следствие чего, обладает повышенной предсказательной силой в части моделирования турбулентных течений в многокомпонентных средах на сетках с неполным разрешением спектра турбулентных пульсаций.

В настоящем докладе представлены результаты верификации методики КАБАРЕ на экспериментах (из проектов HYMERES, HYMERES-2) по исследованию процессов разрушения стратификации легкого газа под воздействием свободной и диффузной (рассеянной на препятствии) струй горячего пара, и перемешивания газа под воздействием систем безопасности (конденсатор, рекомбинатор). Численное моделирование данных задач сопряжено с учетом ряда явлений, связанных с вынужденной и естественной

конвекцией, турбулентным перемешиванием, пристеночной конденсацией пара.

Заметное влияние на стратификацию газов, несмотря на относительно низкие температуры, может оказывать радиационный теплообмен в паре. Так в эксперименте H2P1_0 (HYMERES-2) [2] со свободной струей без учета переноса тепла излучением снижается скорость размытия облака гелия, и в верхней части установки формируются «застойная» зона (рис. 1). Сравнение с экспериментальными данными временной эволюции мольной доли гелия в верхней части сосуда приведено на рисунке 2.

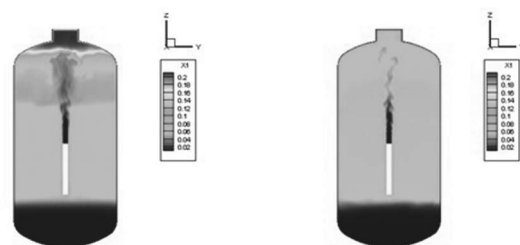


Рис. 1. Распределение гелия в эксперименте H2P1_0 с учетом (справа) и без учета (слева) модели радиационного теплообмена

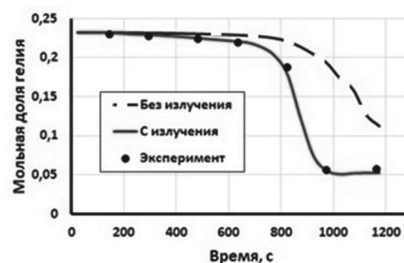


Рис. 2. Сравнение с экспериментальными данными временной эволюции мольной доли гелия в верхней части сосуда с учетом и без учета модели радиационного теплообмена

Список литературы:

1. В.М. Головизнин, М.А. Зайцев, С.А. Карабасов, И.А. Короткин. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов. – М.: Издательство Московского университета, 2013, 472. (V.M. Goloviznin, M.A. Zaitcev, S.A. Karabasov, I.A. Korotkin. Novie algoritmy vychislitelnoi gidrodimamiki dlia mnogoprocessornyh vychislitelnyh kompleksov).
2. D. Paladino, S. Paranjape, R. Kapulla, M. Fehlmann, and S. Suter, "OECD/HYMERES-2 project: definition of the PANDA tests H2P1_0, H2P1_1, H2P1_2, H2P1_3, H2P1_4 belonging to the series: Jet/plume interacting with various obstructions," Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, Switzerland, Tech. Rep. AN-42-17-09, HYMERES – 2-17-01, Dec. 2017.

При проведении расчетов использовались ресурсы Суперкомпьютерного комплекса МГУ

ТЕПЛОТДАЧА И СТРУКТУРА ТУРБУЛИЗОВАННОГО ПОТОКА В КОНФУЗОРЕ

Давлетшин И.А.^{1,2}, Саушин И.И.¹, Гольцман А.Е.¹

¹ Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН,
420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31

² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
420111, Россия, Казань, ул. К. Маркса, 10

Отрицательный градиент давления в канале может способствовать снижению степени турбулентности потока [1, 2]. Сочетание указанного эффекта и турбулизации потока, очевидно, должно особенным образом влиять на гидродинамические и тепловые процессы в потоке.

С целью экспериментального исследования теплоотдачи и кинематической структуры потока в конфузоре была разработана специальная установка. Рабочий участок установки представлял собой плоский канал из прозрачного материала (поликарбоната) длиной 1, 2 м (рис. 1). Конфузорный участок 3 располагался в центре канала. Ширина канала по всей длине составляла 150 мм. На входе в канал было установлено плавное в одной плоскости входное устройство 1. Во входном сечении канала на стыке с плавным входом устанавливались различные устройства для турбулизации потока 5 и 6. В исследованиях применялось 4 варианта устройств: гладкий канал; абразивная шероховатость 6 по периметру входного участка на длине 70 мм; абразивная шероховатость и сетка 5 (диаметр проволоки 1, 1 мм, шаг ячеек 6 мм) по всей площади входного сечения; абразивная шероховатость и сетка с флажками в виде лент длиной 30 мм и шириной 5 мм из полиэтиленовой пленки толщиной 20 мкм, привязанных к узлам сетки с шагом 24 мм в шахматном порядке. Исследовались течения в конфузорах с различными углами сужения.

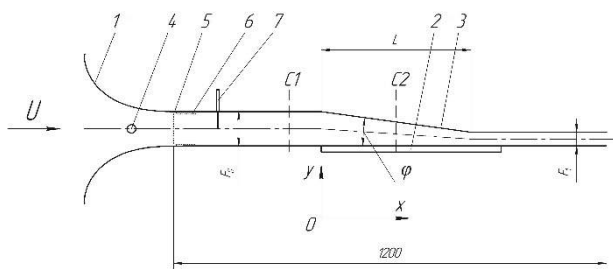


Рис. 1. Рабочий участок: 1 – входное устройство; 2 – теплообменная стенка; 3 – конфузорный участок; 4 – термометр; 5 – сетка (сетка с флажками); 6 – абразивная шероховатость; 7 – термоанемометр; C1 и C2 – сечения оптических измерений.

В работе показано, что в основном повышение степени турбулентности потока приводит к росту теплоотдачи (рис. 2). При этом она при крупномасштабной турбулизации потока флажками, шероховатостью и сеткой в большинстве режимов оказалась несколько меньшей, чем теплоотдача при умеренной турбулизации. Данный факт хорошо согласуется с кинематической картиной течений (рис. 3).

Получены профили скоростей и характеристик турбулентности в характерных сечениях каналов. В основном турбулизация потока приводила к росту

значений характеристик турбулентности. Однако крупномасштабная турбулизация потока (флажками) не привела к интенсивному переходу к турбулентному режиму. Данный эффект может быть связан с выравниванием профиля скоростей или повышением его устойчивости [3]. По-видимому, дополнительно проявлению этого эффекта может способствовать наличие отрицательного градиента давления [1].

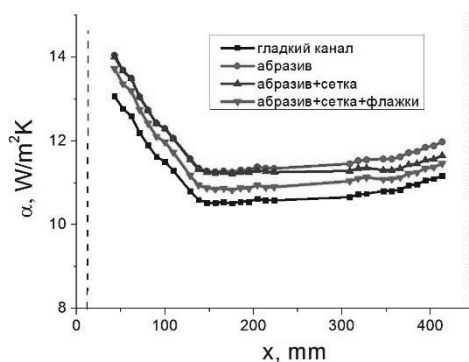


Рис. 2. Коэффициент теплоотдачи в конфузоре с углом сужения 8° при $Re=12600$

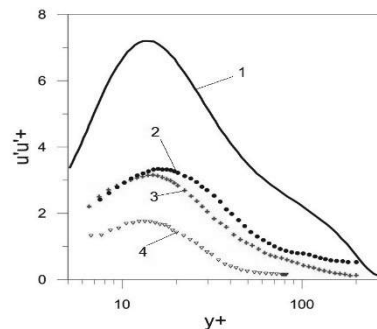


Рис. 3. Профиль турбулентности в среднем сечении конфузора с углом сужения 8° : 1 – расчет DNS в безградиентном потоке; 2 – гладкий канал; 3 – абразив+сетка; 4 – абразив+сетка+флажки.

Список литературы:

1. Moffat R. J., Kays W. M. A review of turbulent boundary layer heat transfer research at Stanford // *Advances in Heat Transfer*. – 1984. – Т. 16. – С. 241–365.
2. E.P. Volchkov, M.S. Makarov, A.Yu. Sakhnov. Heat transfer in the boundary layer with asymptotic favorable pressure gradient // *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55 (2012) 1126–1132.
3. Kühnen J. et al. Relaminarization by steady modification of the streamwise velocity profile in a pipe // *Flow, Turbulence and Combustion*. – 2018. – Т. 100. – №. 4. – С. 919–943.

Исследование поддержано РФФИ
(грант № 18-08-00889)

ОСЦИЛЛИРУЮЩАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ТОНКОМ СЛОЕ Н-БУТАНОЛА, ВЫЗВАННАЯ ЛАЗЕРНЫМ НАГРЕВОМ

Есенбаев Т.Е., Флягин В.М., Иванова Н.А.

Тюменский государственный университет, Тюмень

e-mail: t.e.esenbaev@utmn.ru, v.m.flyagin@utmn.ru, n.ivanova@utmn.ru

Термокапиллярная (ТК) конвекция, индуцированная лазерным нагревом в тонком слое жидкости на твердой подложке, является основой методов лазерной диагностики жидкостей и неразрушающего контроля твердых тел [1]. Несмотря на всестороннюю изученность данного явления, осциллирующая неустойчивость ТК деформации обнаружена впервые.

В работе приведены результаты исследования осциллирующей неустойчивости ТК деформации тонкого слоя н-бутанола, поглощающего излучение лазера, методом фотоабсорбции [2], позволяющим восстановить профиль ТК углубления по интенсивности прошедшего света, и, следовательно, измерить максимальную глубину деформации.

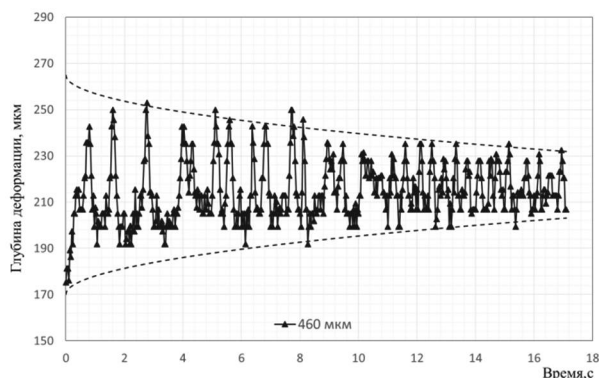


Рис. 1. Процесс затухания осцилляций

Осцилляции ТК деформации записывали на камеру с частотой 30 кадр/с, а затем проводили покадровую обработку и строили зависимость глубины деформации в центре от времени.

Как видно из рис. 1, частота осцилляций возрастает с течением времени, а амплитуда колебаний снижается. Такой затухающий процесс продолжается до полного прекращения осцилляций и выхода на стационарную ТК деформацию. Как видно из рис. 2 (а), (б), увеличение толщины слоя приводит к увеличению амплитуды и уменьшению частоты осцилляций, и, следовательно, затухание колебаний в более толстых слоях занимает большее время. Такое поведение объясняется, с одной стороны, уменьшением гидродинамического сопротивления слоя, а с другой — повышением вклада инерционных эффектов. В целом, осциллирующая неустойчивость ТК деформации была обнаружена для слоев н-бутанола толщиной от 435 до 460 мкм при точечном нагреве слоя лазером мощностью 20 мВт. Для толщин вне данного диапазона наблюдается равномерный рост ТК углубления до выхода на стационарную деформацию.

Объяснением наблюдаемой осциллирующей неустойчивости может служить то, что для приведенной системы в диапазоне толщин от 435 до 460 мкм происходит конкуренция ТК и гравитационных сил, когда их значения сравнимы.

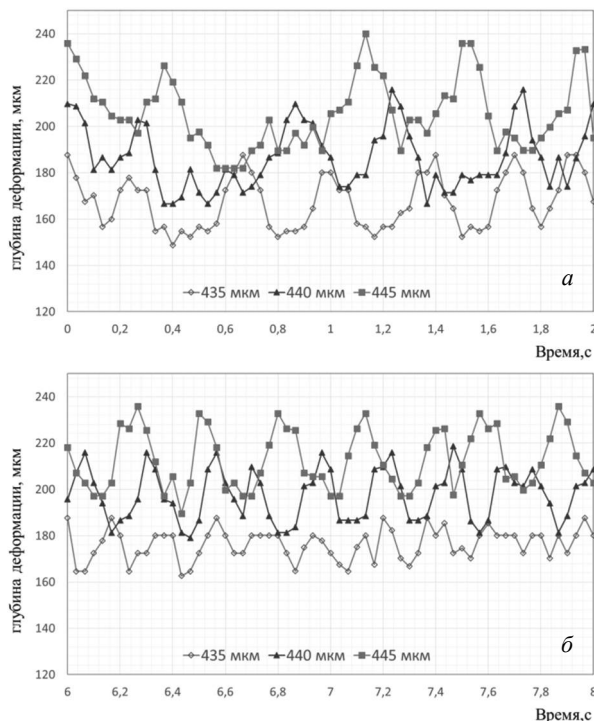


Рис. 2. Динамика развития колебаний для двух интервалов времени от начала осцилляций:
(а) 0...2 сек (б) 6...8 сек

Таким образом, для слоев толщиной менее 435 мкм осцилляции отсутствуют, поскольку небольшая толщина слоя позволяет лазеру прогреть тонкий слой сразу и сформировать ТК деформацию, близкую или равную разрыву. Для слоев толщиной более 460 мкм осцилляции отсутствуют, поскольку при формировании углубления слой прогревается равномерно и образуется стационарная деформация небольшой глубины. Для слоев толщиной от 435 до 460 мкм наблюдается осциллирующая неустойчивость, поскольку прогревание слоя до близкого к разрыву углубления приводит к частичному обратному затеканию такой деформации, которое повторяется до тех пор, пока слой не будет равномерно прогрет по вертикали.

Список литературы:

1. Zykov A.Yu., Ivanova N.A. Laser-induced thermocapillary convection in thin liquid layers: effect of thermal conductivity of substrates // Appl. Phys. B, 2017.
2. Флягин В.М. Применение фотоабсорбции для определения профиля поверхности тонкого слоя поглощающей жидкости, деформированного термокапиллярной конвекцией // Вестник ТюмГУ. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Том 1. № 1(1). С. 29–33.

Работа поддержана РФФИ
(гранты № 18-31-00231, № 17-08-00291)

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил,
«Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина»,
394064, Россия, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а

Основным параметром, используемым при формировании критерия начала ламинарно-турбулентного перехода, является число Рейнольдса. Однако оно, вообще говоря, не является универсальным параметром в том смысле, что критическое число Рейнольдса, определенное для какой-то одной конкретной схемы течения, не представляется возможным использовать для другой схемы течения. Кроме того заметим, что выбор характерного геометрического размера для области течения достаточно сложной формы не является однозначным. То же самое можно отметить и по отношению к выбору характерной скорости. К этому следует добавить, что число Рейнольдса, введенное в рассмотрение традиционным образом, не позволяет конкретизировать в области течения зону непосредственного инициирования начала перехода.

Различными авторами неоднократно рассматривались безразмерные комплексы, которые предполагалось использовать в качестве локальных критериев начала ламинарно-турбулентного перехода. В качестве одного из примеров приведем следующий безразмерный комплекс, предложенный в работе [1]

$$K = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{|\text{grad}\{u^2\}|}{|\bar{F} - \text{grad}\{P\}|}, \quad (1)$$

здесь ρ – плотность жидкости; $\bar{F}$ – вектор плотности массовых сил u , P – распределения модуля скорости и давления в области рассматриваемого ламинарного течения, представляющие собой известные функции пространственных координат $\bar{X} = \{x_1, x_2, x_3\}$.

Этот и подобные ему, но, вообще говоря, другие по своей форме, комплексы, представляя собой функцию пространственных координат, позволяют более «тонко», нежели число Рейнольдса, учитывать особенности полей скорости и давления в рассматриваемой области течения. Не смотря на разнообразие известных безразмерных комплексов такого рода, все они предполагают следующую интерпретацию условия начала перехода.

Пусть максимальное значение соответствующего безразмерного комплекса, например комплекса (1), которое достигается в некоторой точке области A течения, превышает соответствующее критическое значение

$$\max_{\bar{X} \in A} \{K\} > K_{crit}, \quad (2)$$

Тогда такая точка области течения и некоторая ее окрестность начинают выступать в качестве «зоны первичной неустойчивости» и, соответственно, инициатора ламинарно-турбулентного перехода.

Однако, как показывают известные экспериментальные данные, например, по изучению течения Тейлора-Куэтта началу ламинарно-турбулентного перехода может предшествовать режим генерирования вто-

ричных ламинарных течений, характеризующихся формированием поперечных (по отношению к ранее существовавшим линиям тока) составляющих скорости.

Принимая во внимание то обстоятельство, что начальная стадия ламинарно-турбулентного перехода, также как и процесс формирования вторичных течений, характеризуются генерированием поперечных составляющих скорости, на основе обработки известных экспериментальных данных различных авторов были предложены следующие эмпирические условия начала перехода.

Если в некоторой зоне $G \subset A$ области течения оказывается справедливым следующее неравенство

$$K_2 > k_0 + \frac{k_1}{K_3 - k_2}, \quad (3)$$

то в этой зоне предполагается генерирование поперечных составляющих скорости. Это неравенство (3) можно рассматривать как необходимое, хотя и не достаточное условие для начала перехода. В этой связи по аналогии с (2) предлагается потребовать выполнение еще одного эмпирического условия

$$\max_{\bar{X} \in G} \{K_1\} > q_0 \cdot (K_3)^2, \quad (4)$$

В (3), (4) приняты следующие обозначения: k_0 , k_1 , k_2 , q_0 – эмпирические константы; K_1 , K_2 , K_3 – безразмерные комплексы, определяемые следующим образом

$$K_1 = \frac{E}{D}; K_2 = \frac{|I_2| \cdot \rho^2 \cdot u^2}{E^2}; K_3 = \frac{\rho^2 \cdot u^3}{\mu \cdot E}; \quad (5)$$

$$\bar{E} = \text{grad} \left\{ P + \frac{\rho \cdot u^2}{2} \right\}, \bar{D} = \text{grad} \left\{ 2 \cdot \mu \cdot \sqrt{|I_2|} \right\},$$

где μ – динамическая вязкость жидкости; I_2 – второй инвариант тензора скоростей деформаций; $\bar{E}$, $\bar{D}$ – векторы, характеризующие направление и степень максимального нарастания плотности полной энергии потока и фактора диссипации, соответственно.

Поскольку по своему смыслу безразмерный комплекс K_1 является аналогом числа Рейнольдса, неравенство (3) при одновременном выполнении (2) предлагается интерпретировать, как условие неограниченного возрастания, генерируемых поперечных составляющих скорости.

На примерах ряда известных одномерных схем течения с учетом (3), (4) проведен анализ прогнозирования начала ламинарно-турбулентного перехода.

Список литературы:

1. Hanks R.W. The Laminar-Turbulent Transition for flow in Pipes, Concentric Annuli, and Parallel Plates. // A.I.Ch.E. Journal. 1963. V. 9. № 1. P. 45–48.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ С ЭФФЕКТОМ «ОТВЕРДЕВАНИЯ»

Колодезнов В.Н.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил,
«Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина»,
394064, Россия, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а

Среди многообразия известных материалов можно выделить некоторые рабочие среды, которые демонстрируют аномалии, в частности, вязкого поведения. Это относится, в том числе, к некоторым видам суспензий на основе полимерных жидкостей и мелкодисперсных частиц при определенных сочетаниях их размеров и концентрации [1].

Основная особенность вязкого поведения таких суспензий заключается в следующем. При приближении значений скорости сдвига $\dot{\gamma}$ к некоторому критическому уровню $\dot{\gamma}_l$ жидкость начинает проявлять дилатантные свойства. При этом увеличение вязкости становится настолько существенным, что жидкость ведет себя подобно твердому телу, что позволяет говорить о ее «упрочнении» или проявлении эффекта «отвердевания». При снижении скорости сдвига ниже критического уровня жидкость «восстанавливает» свои исходные показатели вязкости.

Следует заметить, что здесь речь идет не о традиционном фазовом переходе типа «жидкость – твердое тело», а об изменении внутренней структуры материала, связанной с формированием мелкодисперсными частицами ассоциаций или кластеров типа «твердых» структур.

Хорошо известны реологические модели дилатантных жидкостей, например, со степенным законом вязкости, которые при неограниченном (по крайней мере, на модельном уровне) увеличении скорости сдвига демонстрируют монотонное возрастание вязкости.

Однако, характерной особенностью обсуждаемых рабочих сред является то, что эффект «отвердевания» проявляет себя уже при конечных и сравнительно небольших скоростях сдвига. Поэтому известные традиционные реологические модели дилатантных жидкостей не могут быть приняты за основу при описании течения таких сплошных сред с учетом эффекта их возможного «отвердевания».

Еще одной особенностью некоторых реальных рабочих сред такого рода является проявление пластических свойств. При этом, собственно говоря, именно пластичность и позволяет производить из таких материалов изделия «фиксированной» формы. Иначе говоря, эти материалы ведут себя подобно твердым телам и при сравнительно малых (не превышающих предел текучести), и при достаточно больших напряжениях (точнее говоря, при достаточно больших скоростях сдвига).

Как известно, вязкие свойства жидкости характеризует «крутизна» кривой течения, представляющая собой тангенс угла наклона касательной к графику зависимости касательного напряжения от скорости сдвига. В этой связи для описания механического поведения рассматриваемых суспензий может быть

в случае одномерного сдвигового течения предложена следующая реологическая модель

$$|\dot{\gamma}| = \begin{cases} 0; & |\tau| < \tau_0; \\ \left[1 - \left(\frac{\tau_1 - |\tau|}{\tau_1 - \tau_0} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \cdot \dot{\gamma}_l; & \tau_0 \leq |\tau| \leq \tau_1; \end{cases} \quad (1)$$

$$0 < n < 1; |\dot{\gamma}| \leq \dot{\gamma}_l,$$

которая обеспечивает (на модельном уровне) выполнение условия «отвердевания»

$$\lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \dot{\gamma}_l} \left(\frac{d|\tau|}{d|\dot{\gamma}|} \right) = \infty.$$

В последних соотношениях приняты следующие обозначения: τ - касательное напряжение; τ_0 - предел текучести, τ_1 - касательное напряжение, достигаемое при критическом значении скорости сдвига; n - константа модели.

Предложена методика решения задач гидродинамики таких жидкостей, которая в общем случае предполагает разделение области течения на три зоны: зону пластического состояния, зону течения с дилатантным поведением и зону «отвердевшей» жидкости. В соответствии с этой методикой рассмотрена задача о ламинарном течении жидкости с реологической моделью (1) в канале кольцевого поперечного сечения под действием заданного перепада давления.

Показано, что в зависимости от перепада давления возможны две, вообще говоря, разные схемы течения.

Если перепад давления не превышает некоторого критического значения, в канале реализуется традиционное течение вязкопластической дилатантной жидкости с движущимся жестким ядром в центральной части сечения канала.

При превышении же перепадом давления критического уровня на внутренней и внешней цилиндрических поверхностях канала, в дополнение к зоне пластического течения, формируются периферийные зоны, заполненные неподвижным материалом «отвердевшей» жидкости. При этом по мере дальнейшего увеличения давления ширина периферийных зон возрастает, а объемный расход через канал снижается. Иначе говоря, увеличение перепада давления на длине канала сопровождается в этом случае эффектом «запирания» канала.

Список литературы:

1. Broun E., Jaeger H.M. Shear thickening in concentrated suspension: phenomenology, mechanisms and relations to jamming. // Reports on Progress in Physics. 77 (2014) 046602. 23 pp. doi:10.1088/0034-4885/77/4/0466.

ВЛИЯНИЕ КВАНТОВОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ МОЩНЫХ ТЕПЛОВЫХ ИМПУЛЬСОВ И ПРОЦЕССЫ ВСКИПАНИЯ В СВЕРХТЕКУЧЕМ ГЕЛИИ

Кондаурова Л.П.^{1,2}, Ефимов В.Б.³

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14

³ Институт физики твердого тела РАН,
142432, Россия, Московской обл., Черноголовка, ул. Академика Осипяна, 2

Сверхтекучий гелий является уникальной средой, которая позволяет исследовать явления переноса, недоступные для анализа соответствующих процессов в обычных жидкостях. Существование противотока, которому нет аналога в обычных жидкостях, а также квантовой турбулентности, представляющей собой набор квантованных вихревых нитей, существенным образом изменяют процессы теплопередачи. Исследование этих процессов представляет не только научный интерес, но и практическое значение, учитывая широкое использование сверхпроводящих магнитов в современной промышленности при температурах ниже 2К. Единственным хладагентом при этих температурах является сверхтекучий гелий. Локальное тепловыделение может привести к внезапному испарению гелия, образованию паровой пленки и дальнейшему нагреву поверхности сверхпроводника, что может привести к аварийной ситуации.

Экспериментальное изучение особенностей распространения мощных тепловых импульсов в зависимости от их длительности, амплитуды при различных температурах изучалось многими исследовательскими группами на протяжении более шестидесяти лет. Серия экспериментальных работ, проведенных в конце семидесятых – начале восьмидесятых годов, по сути дела, открыла новую область в исследовании сверхтекучей турбулентности, а именно развитие вихревой структуры мощными тепловыми потоками за очень короткие времена. В настоящее время эти исследования являются актуальными, поскольку развитая современная низкотемпературная техника позволяет сделать более точные измерения, что позволяют ответить на открытые до сих пор вопросы. Во всех работах показано взаимное влияние тепловых импульсов и квантованных вихревых нитей. В зависимости от температуры, когда вихревые линии практически отсутствуют, по мере распространения прямоугольного импульса в среде образуются разрывы на переднем, на заднем фронте волны или форма импульса не изменяется в зависимости от коэффициента нелинейности скорости второго звука. Изменение формы импульса также происходит и вследствие развития квантовой турбулентности. В зависимости от величины фоновой плотности вихревого клубка и его распределения по пространству в экспериментах наблюдают различную динамику этих импульсов. Так в серии экспериментальных работ Фишдона и других, проведенных при температуре невозмущенного гелия 1.4 К, по изучению динамики импульсов амплитудой 5 и 6 Вт/см² запущенных в периодическом режиме, в точках на расстоянии 1–2 мм от нагревателя наблюдали резкое по-

вышение температуры после прихода теплового импульса пр. Объяснение наблюдаемой картины было дано в рамках гидродинамики сверхтекучей турбулентности [1] в работе [2], в которой было показано, что это связано с большим значением фоновой турбулентности.

Нами проведено экспериментальное и численное изучение динамики одиночных мощных прямоугольных тепловых импульсов в зависимости от их длительности при температуре невозмущенного гелия 1.88 К в квазидвумерной геометрии в длинном капилляре. Подробное описание эксперимента см. в [3]. Длительность импульса амплитудой $q=11$ Вт/см² изменялась от 0,01 мс до 1 мс. Изучение формы тепловых импульсов в точке, расположенной на расстоянии 33,6 мм от нагревателя, показало, что включение теплового потока в волноводе приводит к быстрой (за сотни микросекунд) генерации вихревого клубка вблизи нагревателя. Развитие квантовой турбулентности приводит к замедлению противотока нормальной и сверхтекучей компонент, к резкому уменьшению теплопроводности сверхтекучего гелия.

Численные исследования динамики мощных тепловых импульсов и определение времени вскипания при различных температурах и значениях мощностей теплового потока проведены в рамках уравнений гидродинамики сверхтекучей турбулентности [2], разложенных второго порядка точности по отклонениям. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных и расчетных значений по динамике тепловых импульсов.

Проведенные расчеты по определению времени вскипания гелия позволили объяснить полученные в работе [4] экспериментальные кривые.

Список литературы:

1. Немировский С.К., Лебедев В.В. Гидродинамика сверхтекучей турбулентности // ЖЭТФ. 1983. Т. 84. С. 1729–1742.
2. Kondaurava L.P., Nemirovskii S.K. Unsteady heat transfer in He II in cylindrical and spherical geometries // Journal of Low Temperature Physics. 2008. V. 150, No. 3/4. P. 200–205.
3. Ефимов В.Б. Акустическая турбулентность волн второго звука в сверхтекучем гелии // УФН. 2018. Т. 188, № 10. С. 1025–1048.
4. Wang R. Criterion for quantum turbulence onset after rectangular heat pulse in superfluid helium // Cryogenics. 1995. V. 35, No. 12. P. 883–886.

Численное моделирование выполнено в рамках гранта РНФ № 19-19-00321, экспериментальные исследования выполнены при поддержке программы Президиума РАН «Нелинейная динамика»

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН РАСПЛАВОВ СОЛЕЙ В РЕАКТОРЕ ТОКАМАКА

Котляр А.В.¹, Листратов Я.И.^{1,2}, Свиридов В.Г.^{1,2}, Беляев И.А.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
11250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14

² Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13 с. 2

До недавнего времени перспективными теплоносителями термоядерной энергетики считались жидкие металлы, то есть жидкости с числом Прандтля $Pr \ll 1$. При исследовании теплообмена данных жидкостей в магнитном поле было обнаружено несколько негативных эффектов:

1. Значительный рост гидравлического сопротивления при их течении в каналах в поперечном магнитном поле токамака;

2. Сильная неоднородность локальных коэффициентов теплоотдачи по сечению канала, что может привести к локальному перегреву и расплавлению стенки;

3. Пульсации температуры низкой частоты и аномально высокой интенсивности, которые, проникая в стенку, вызывают её усталостное разрушение.

В связи со всем вышеперечисленным в последние годы вновь возрос интерес к использованию расплавленных солей как альтернативы жидким металлам в ядерной и термоядерной энергетике. Расплавленные соли – фториды лития и бериллия ($\text{LiF} \cdot \text{BeF}_2$ – «флайб») и фториды щелочных металлов ($\text{LiF} \cdot \text{NaF} \cdot \text{KF}$ – «флинак») рассматриваются как возможные теплоносители и рабочие среды в теплообменных системах перспективных ядерных реакторов и гибридных токамаков – термоядерных источников нейтронов.

Таким образом, одним из перспективных направлений развития ядерной энергетики является создание реакторов на расплавах солей и разработка гибридных термоядерных установок. Создание подобных систем сопряжено с решением множества технических и научных проблем. Из-за высокой температуры плавления солей и ограничений применимости конструкционных материалов, рабочая температура реактора находится в достаточно узком диапазоне. Он составляет около ста градусов. В этой связи проблема тепло гидравлического обоснования проектов также стоит достаточно остро. При этом требуется достаточно точное знание не только средних, но и локальных характеристик теплообмена.

В случае использования расплавов солей в гибридных реакторах на основе реакторов токамаков движение расплавов солей будет происходить в сильных магнитных полях, а имеющаяся экспериментальная информация [1, 2] свидетельствует о том, что их влияние может быть существенным даже при относительно небольших числах Гартмана Ha , и этим влиянием пренебрегать нельзя. Непосредственное воспроизведение этих условий в научных экспериментах слишком дорогостояще, исследования идут путем численного моделирования и с использованием модельных теплоносителей. Для воссоздания условий, близких к условиям ТИН (термоядерный источник нейтронов), был использован модернизированный

экспериментальный стенд РК-3 в качестве модельной жидкости был выбран 30% раствор КОН (РК-3 – Ртутный контур третьего поколения [3] изначально созданный для исследования жидкометаллических теплоносителей). Также параллельно с экспериментальным исследованием проводилось численное моделирование методом DNS. При этом проводилось сопоставление данных полученных в расчёте и эксперименте.

Прямое численное моделирование (DNS) в нашем случае означает решение полных нестационарных трехмерных уравнений Навье-Стокса, уравнений неразрывности и уравнения энергии с учетом различных компонент, отвечающих за влияние массовых сил. В данной работе исследовалось опускное течение в вертикальной трубе с равномерным нагревом.

Экспериментальные и численные исследования характеристик теплопередачи имитатора расплавленной соли были проведены для опускного течения в вертикальной трубе с числами Рейнольдса ($Re = 4 \times 10^3 - 20 \times 10^3$) под воздействием магнитного поля ($Ha = 0 - 12$) и значительных значений теплового потока (G до 10^8). Были проведены расчеты теплопередачи имитатора расплавленной соли в режимах, которые реализуются в эксперименте. Кроме того, были проведены расчеты при режимных параметрах, которые невозможно было реализовать в экспериментальном исследовании ($Ha = 12 - 50$). Полученные результаты качественно согласуются с экспериментальными данными. В случае развитого турбулентного течения влияние магнитного поля на структуру потока и турбулентность проявляется в виде частичного подавления пульсаций скорости и увеличения пульсаций температуры без развития периодических пиков. На основе этого основного результата планируется дальнейшее численное и экспериментальное исследование, включающее экспериментальные измерения компонент пульсаций скорости и численное моделирование в более широком диапазоне параметров.

Список литературы:

1. Yokomine T. et al. Experimental investigation of turbulent heat transfer of high prandtl number fluid flow under strong magnetic field // Fusion Science and Technology. – 2007. – Vol. 52 – p. 625–629.
2. Nakaharai H. et al. The influence of a magnetic field on turbulent heat transfer of a high Prandtl number fluid // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2007. – Vol. 32 – p. 23–28.
3. Беляев И. А. и др. Экспериментальный стенд для исследований теплообмена перспективных теплоносителей ядерной энергетики // Тепловая инженерия. – 2017. – №. 32 – С. 66–74.

*Работа выполнена при поддержке гранта
Министерства образования и науки
РФ № 13.9619.2017/8.9*

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕЖАЕМОСТИ НА ПЕРЕХОД К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В СТРУЯХ

Леманов В.В., Лукашов В.В., Шаров К.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В настоящее время процесс ламинарно-турбулентного перехода в струях изучен достаточно подробно. При этом в большей части работ истечение происходит из сопел, но на практике часто встречаются струи истекающие из длинных каналов, например, в горелках [1]. Известно, что в области чисел $Re=2000-3000$ в трубах происходит переход к турбулентности, что значительно сокращает длину ламинарной части струй [2–3]. В процессе перехода в каналах образуются локальные вихревые структуры [4]. В связи с этим встала задача изучения ламинарно-турбулентного перехода в струях в условиях развития неустойчивости в струйном источнике.

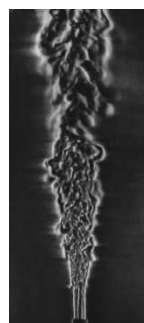
В экспериментах осесимметричные струи формировались с помощью круглых трубок диаметром $d=1-15$ мм и длиной L больше $100d$. В качестве рабочего газа использовались: воздух, азот, двуокись углерода, гелий, пропан, элегаз, фреон-22. Диапазон чисел Рейнольдса для круглой струи $Re=Ud/v=200-15000$, где U – среднерасходная скорость струи в выходном сечении канала. Измерения выполнены с помощью методов гильберт-визуализации, термоанемометрии [1] и скоростной визуализации (4000 fps) посредством помещённых в поток светорассеивающих частиц, подсвеченных лазерным ножом.

С помощью измерений на выходе из канала были определены диапазоны чисел Re для трёх режимов: ламинарного, переходного и турбулентного. В переходном режиме ($Re=1800-2000$, пропан-бутан) происходит перестройка профиля скорости, вызванная потерей устойчивости, с перемежаемым характером течения и наличием турбулентных пятен (ТП). Полученные данные согласуются с известными результатами других авторов [4].

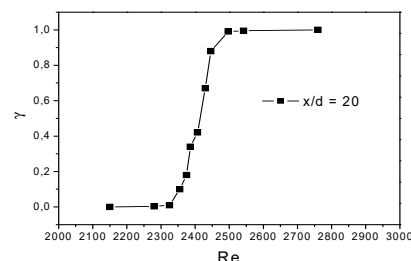
Далее были выполнены измерения осевых скоростей и пульсаций скорости по длине в ближнем поле течения газовых струй. С увеличением числа Re длина ламинарного участка сокращается, а максимум пульсаций в области перехода возрастает. При $Re=1915$ (пропан-бутан) возникает перемежаемый характер течения в источнике струи, и в результате резко увеличиваются флуктуации в её ближнем поле (при $x/d=8$ до значения $Tu=30\%$). При дальнейшем росте числа Рейнольдса ($Re>1915$) начальный уровень пульсаций снижается.

В режиме перемежаемости в струйном источнике была выполнена визуализация вихревых структур. Пример такой гильберт-визуализации представлен на рис. 1а ($d=3.2$ мм, $L=550$ мм, пропан, $Re=2900$). Вблизи начала струи наблюдается турбулентное пятно протяженностью порядка 10–12 диаметров трубки. В экспериментах с термоанемометром наблюдается перемежаемый характер изменения мгновенной скорости по времени, который связан с наличием турбулентных пятен (puff – с плавным передним фронтом и резким задним фронтом) в области ближнего поля

струи. Характерное распределение коэффициента перемежаемости ТП γ представлено на рис. 1б для фиксированной точки на оси струи (трубка $d=3.2$ мм, $L=1000$ мм). При числе Рейнольдса $Re=2280$, характеризующего нижнюю границу ламинарно-турбулентного перехода γ близок к 0. Это говорит о том, что локализованные турбулентные структуры практически не встречаются. Когда значение $\gamma \approx 0.5$, примерно половину времени поток ламинарный, а вторую половину присутствуют турбулентные пятна, следующие случайным образом. При числе Рейнольдса, характеризующего верхнюю границу ламинарно-турбулентного перехода $Re=2550$ значение $\gamma=1$. В этом случае ламинарных участков по времени не существует.



(а)



(б)

Рис. 1. а) Визуализация турбулентного пятна в свободной струе углеводорода (течение снизу вверх);
б) распределение перемежаемости в струе воздуха ($x/d=20$).

По характеру течения ближнее поле струи ($x/d<40$) в диапазоне чисел Рейнольдса 1900–3200 можно условно разделить на две пространственные зоны: приосевую и периферийную. Эти две зоны смыкаются вблизи максимума пульсаций скорости на оси струи. Диагностика вихревых структур в этой области крайне затруднена.

Список литературы:

1. В.В. Леманов, В.В. Лукашов, Р.Х. Абдрахманов и др. Режимы неустойчивого истечения и диффузионного горения струи углеводородного горючего // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54, № 3. С. 3–12.
2. Леманов В.В., Терехов В.В., Шаров К.А. и др. Экспериментальное исследование затопленных струй при низких числах Рейнольдса // Письма ЖТФ. 2013. Т. 39, В.9. С. 34–40.
3. Анискин В.М., Леманов В.В., Маслов Н.А. и др. Экспериментальное исследование течения дозвуковых плоских мини- и микроструй воздуха // Письма ЖТФ. 2015. Т.41, В.1. С. 94–101.
4. Н.В. Никитин, В.О. Пиманов О поддержании колебаний в локализованных турбулентных структурах в трубах // Изв. РАН. МЖГ. 2018. № 1. С. 68–76.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ
(грант № 17-08-00958)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОРАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ СМЕСИ С МАЛЫМ ЧИСЛОМ ПРАНДТЛЯ В ОРЕБРЕННОЙ ОДИНОЧНОЙ ТРУБЕ ЛЕОНТЬЕВА

Макаров М.С.^{1,2}, Макарова С.Н.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

При энергоразделении теплота передается от одной части газового потока к другой без теплообмена с внешними источниками теплоты за счет разницы температур, возникающей при расширении газа, вязкой диссипации, вихревого эффекта и т.д. В трубе Леонтьева перенос тепла осуществляется через стенку, обтекаемую с одной стороны сверхзвуковой, а с другой стороны дозвуковой частью газового потока, истекающего из общего ресивера [1, 2]. Лучшими теплоносителями для энергоразделения в трубе Леонтьева являются газовые смеси с малым числом Прандтля – гелий-ксенон, гелий-аргон, водород-ксенон, водород-аргон. Интенсивность энергоразделения зависит и от термического сопротивления разделительной стенки, а также внешних термических сопротивлений пристенных пограничных слоев. Минимальным термическим сопротивлением обладают стенки из меди малой толщины. Внешние термические сопротивления можно уменьшить за счет оребрения разделительной стенки. Поскольку высокоскоростные (сверхзвуковые) течения чувствительны к различным препятствиям на обтекаемой поверхности, а наличие сверхзвукового течения является необходимым условием энергоразделения в трубе Леонтьева, следует рассматривать оребрение разделительной стенки со стороны дозвукового потока.

В данной работе представлены результаты численного моделирования энергоразделения в трубе Леонтьева с оребренной разделительной стенкой. Схема трубы, геометрия расчетной области, граничные условия и пример расчетной сетки представлены на рис. 1. Конфигурация сверхзвукового сопла, геометрия разделительной стенки, за исключением оребрения соответствуют трубе Леонтьева из работы [1].

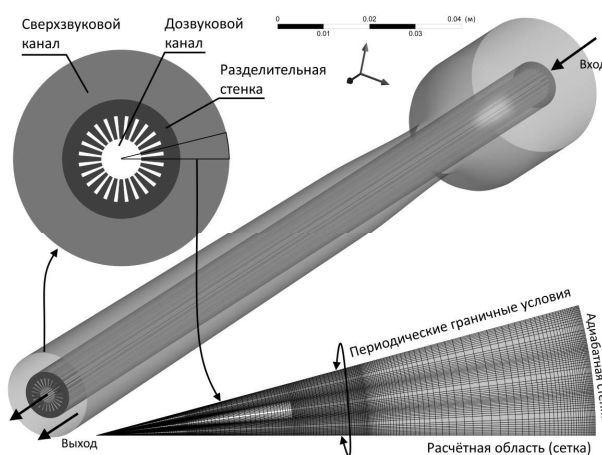


Рис. 1. Труба энергоразделения с оребренной разделительной стенкой (схема течения, геометрия расчетной области, граничные условия и пример расчетной сетки).

Предварительный анализ, представленный в работе [2], показал, что при низком термическом сопротивлении разделительной стенки (менее 10^{-3} м²К/Вт) эффективное оребрение приводит к существенному росту теплового потока от дозвукового канала к сверхзвуковому. Для представленной на рис. 1 трубы Леонтьева термическое сопротивление разделительной медной стенки $\delta/\lambda_s = 3,74 \times 10^{-6}$ м²К/Вт, $\eta_1 = 1$, $\eta_2 = 4,7$. Расчеты по [2] показывают увеличение относительной плотности теплового потока на участке развитого сверхзвукового потока в 1,83 раза по сравнению со стенкой без оребрения.

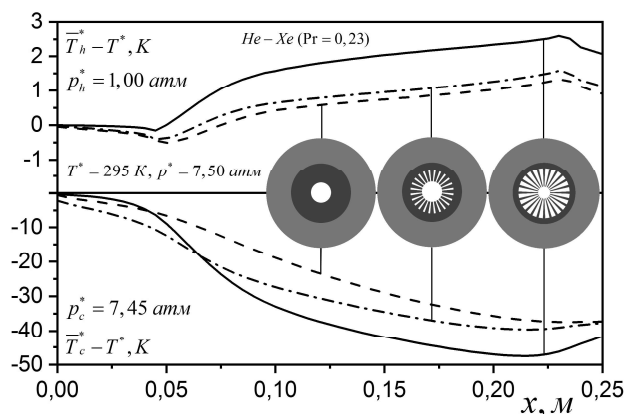


Рис. 2. Изменение среднemasовой температуры торможения по длине трубы Леонтьева в сверхзвуковом канале (сверху) и дозвуковом канале (снизу).

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования изменения среднemasовой температуры торможения по длине трубы с оребренной стенкой и стенкой без оребрения. Оребрение приводит к понижению температуры дозвукового потока сразу за критическим сечением внешнего сопла. Труба Леонтьева с оребренной разделительной стенкой может иметь меньшую длину, чем труба без оребрения, при той же степени охлаждения дозвукового потока и большую эффективность.

Список литературы:

1. Zditovets A.G., Vinogradov Yu.A., Titov A.A. Experimental investigation of the heat transfer process at a gas-dynamic method of energy separation // Proc. of the IHTC15. – 2014. – IHTC15-8965. – 16 p.
2. Leontiev I.A., Zditovets A.G., Vinogradov Y.A., Strongin M.M., Kiselev N.A. Experimental investigation of the machine-free method of temperature separation of air flows based on the energy separation effect in a compressible boundary layer // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2017. – V. 88. – p. 202–219.
3. Makarov M.S., Makarova S.N., Naumkin V.S. Energy separation efficiency of air and helium-xenon mixture flowing in the single Leontiev tube with finned wall // Journal of physics: Conference series. – 2018. – V. 1128. – 012018. – 6 p.

ТЕПЛООБМЕН РАВНОВЕСНО ДИССОЦИИРУЮЩЕГО ГАЗА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Матвиенко О.В., Мартынов П.С.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

Задачи, связанные с гидродинамикой и теплообменом при ламинарном течении, являлись предметом исследования в течении длительного времени. В [1] собраны имеющиеся в литературе решения задач теплообмена при ламинарной вынужденной конвекции жидкости в трубах различного сечения при различных граничных условиях.

Целью настоящей работы является численное исследование влияния протекания первой стадии реакции диссоциации тетраоксида азота на теплообмен потока в круглой цилиндрической трубе. Реакция диссоциации тетраоксида азота протекает в две стадии: $N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2 \rightleftharpoons 2NO + O_2$. При нагреве первая стадия протекает быстро и может считаться равновесной. Вторая стадия протекает с конечной скоростью. При таких условиях можно рассматривать процессы тепломассопереноса отдельно для каждой стадии.

Для описания структуры потока используются двумерные осесимметричные уравнения Рейнольдса, записанные относительно осредненных по времени составляющих осевой и радиальной скоростей, давления [2, 3]. Исследования характеристик турбулентности осуществлялось с использованием составной модели Ментера SST (Shear Stress Transport) [4, 5], которая представляет собой комбинацию $k-\epsilon$ и $k-\omega$ моделей турбулентности, обеспечивающую сочетание лучших качества этих моделей.

Для определения турбулентной вязкости по известным значениям k и ω в SST модели используется выражение, базирующееся на гипотезе Брэдшоу [6] о пропорциональности напряжению сдвига в пристеночной части пограничного слоя энергии турбулентных пульсаций:

$$\mu_t = \min \left[\frac{\rho k}{\omega}, \frac{\gamma k}{F_2 G} \right],$$

где μ_t – турбулентная вязкость, ρ – плотность среды, k – кинетическая энергия турбулентности, ω – удельная скорость диссипации, γ – эмпирическая константа, F_2 – эмпирическая функция.

На входе в канал задается распределение скорости потока, температуры и параметров турбулентности. На оси канала реализуются условия симметрии. На стенках канала выполняются условия прилипания и идеальной теплопроводности, кинетическая энергия турбулентности полагается равной нулю. Величина частоты турбулентных пульсаций ω определяется в ближайшем к твердой стенке узле конечноразностной сетки.

Уравнения Рейнольдса были решены численно с использованием метода конечного объема [7]. Численное решение проводилось с использованием шахматной сетки, причем узлы для осевой и радиальной составляющих скорости располагались в середине

граней контрольных объемов для скалярных величин. Вблизи стенок, а также в областях с большими градиентами скорости и концентрации проводилось сгущение сетки. Уравнение неразрывности удовлетворялось с помощью алгоритма SIMPLER [8]. Считалось, что сходимость итераций достигнута, если среднеквадратичная невязка для всех переменных не превышала 1%. Для оценки точности вычислений была выполнена серия расчетов на последовательно сгущающихся сетках. Результаты тестирования показали: уменьшение шага базовой сетки в 2 раза по осевой и радиальной координатам приводит к изменению значений основных переменных не более чем на 1%.

Результаты расчетов показывают, что с увеличением температуры стенки интенсифицируется протекание в потоке химической реакции и поглощение тепла, подводимого от стенки. Температура пристеночных слоев в химически реагирующем потоке становится ниже, чем в потоке с инертным теплоносителем, а толщина температурного пограничного слоя – уже. Увеличение скорости прокачки реагента и, связанное с этим, уменьшение температуры в пристеночной области на одном и том же удалении от входа приводит к увеличению концентрации N_2O_4 и ослаблению диссоциации. Использование диссоциирующего теплоносителя становится эффективным при невысокой скорости прокачки в длинных каналах. Эффективность использования в качестве теплоносителя диссоциирующего газа при низких значениях температуры стенки является незначительной. При течении эндотермически реагирующего потока теплоотдача возрастает. При этом в отличие от инертного теплоносителя величина числа Нуссельта на начальном участке зависит от температуры стенки.

Список литературы:

1. Справочник по теплообменникам. Т. 1. / пер. с англ.: Под ред. Петухова Б.С., Шикова В.К. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.
2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1974.
3. Матвиенко О.В., Бубенчиков А.М. Математическое моделирование теплообмена и химического реагирования закрученного потока диссоциирующего газа // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89. № 1. С. 118–126.
4. Menter F.R. (1993) Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows. AIAA Paper. Technical Report No. 93–2906.
5. Menter F.R., Rumsey C.L. (1994) Assessment of Two-Equation Turbulence Models for Transonic Flows. AIAA Paper. No. 94–2343.
6. Bradshaw P., Ferriss D.H., Atwell N.P. Calculation of boundary layer development using the turbulent energy equation // Journal of Fluid Mechanics. 1967. V. 28. P. 593–616.
7. Патанкар С. Численные методы решения задач тепломассообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1983.
8. Van Doormal J.P., Raithby G.D. Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows // Numerical Heat Transfer. 1984. V. 7. P. 147–163.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕЧЕНИЯ НЕДОРАСШИРЕННЫХ СТРУЙ НА ДЛИНУ СВЕРХЗВУКОВОГО УЧАСТКА

Миронов С.Г., Анискин В.М., Маслов А.А.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4

Изучение процесса смешения при истечении сверхзвуковых струй в затопленное пространство имеет практическое значение при выборе методов создания локального струйного нагрева или охлаждения поверхности. Смешение газа струи с газом из окружающего ее пространства является основным процессом ограничивающим длину сверхзвуковой струи. Этот процесс может быть, как ламинарным, так и турбулентным. При турбулентном режиме течения процесс смешения резко усиливается, ускоряется торможение сверхзвукового потока и длина сверхзвукового участка струи сокращается. На потерю устойчивости ламинарной сверхзвуковой струи и переход к турбулентному течению большое влияние оказывают параметры истечения газа из сопла и параметры газа окружающего пространства. Для задач изучения сверхзвуковых микроструй представляют интерес данные о длине сверхзвукового участка недорасширенных струй, полученные в диапазоне умеренных чисел Рейнольдса охватывающих ламинарный, переходный и турбулентный режимы течения струй. В данной работе выполнено экспериментальное исследование газодинамики течения сверхзвуковых недорасширенных струй различных газов в газовой среде с отличными от струи свойствами. Основное внимание уделено влиянию различия в плотности газа в струе и газа во внешнем пространстве на длину сверхзвукового участка (дальнобойность) недорасширенной струи.

Эксперименты проводились на струйном стенде низкого давления ИТПМ СО РАН. Недорасширенные струи истекали из звуковых сопел диаметром $d=0,52$ и $1,06$ мм. В качестве рабочих газов струи и среды использовались He, воздух, Ar, CO_2 и SF_6 . Измерения производились на оси струйного течения трубкой Пито с внешним диаметром $0,4$ мм и внутренним диаметром $0,17$ мм, которая была установлена на 3-компонентном координатном устройстве. Длина сверхзвукового участка определялась как расстояние от среза сопла до точки достижения давления P_0' , соответствующего числу $M=1$. Эксперименты проводились, как с холодными, так и нагретыми струями. Также проводились измерения амплитуды пульсаций давления и частоты акустического излучения, создаваемого недорасширенными струями во внешней среде. Интенсивность этого излучения считалась индикатором устойчивости струйного течения.

Измерения длины сверхзвукового участка показали, что дальнобойность недорасширенных струй зависит от отношения плотности газа в струе к плотности газа во внешнем пространстве. При этом не имеет принципиального значения, каким образом варьируется это отношение — изменением молекулярного состава газа внешней среды или нагревом газа струи. При величине отношения плотности газа среды ρ_a к

плотности газа в струе ρ_j лежащей в диапазоне $1,0 > \rho_a/\rho_j > 0,4$ дальнобойность недорасширенной струи минимальна. Это соответствует случаю течения струй воздуха, CO_2 и Ar в среде воздуха, CO_2 и Ar, а также течению струи SF_6 в среде SF_6 . Вне этого диапазона дальнобойность недорасширенной струи в разы выше. Это соответствует течению струи воздуха в среде He или SF_6 , а также струи SF_6 в воздушной среде. Аналогичные результаты были получены при нагревании до 650 К струи воздуха, истекающей в холодный воздух. При достижении границы диапазона отношения ρ_a/ρ_j , дальнобойность воздушной струи резко возрастала, достигая значений соответствующих истечению воздуха в SF_6 .

Измерения характеристик акустического излучения, создаваемого недорасширенными струями в окружающей среде на частоте, так называемого «дискретного тона», показали подавление «тона» и увеличение дальнобойности недорасширенной струи при выходе условий течения за границу вышеупомянутого диапазона отношения плотностей ρ_a/ρ_j , либо с помощью изменения молекулярного состава внешней к струе среды, либо нагревания газа струи. Результаты экспериментов были проанализированы в рамках модели глобальной неустойчивости струйных течений [1, 2].

Было показано, что уменьшение плотности газа внешней среды увеличивает скорость звука, а увеличение плотности уменьшает скорость звука в среде. Это приводит к тому, что выход величины отношения плотностей газа среды и струи за границы диапазона $1,0 > \rho_a/\rho > 0,4$ соответствует существенному увеличению разницы в скорости конвекции возмущений в слое смешения струи и скорости звука во внешней среде, нарушению фазового соответствия в петле обратной связи и изменению диаграммы направленности акустических пульсаций в направлении сопла. В конечном итоге это приводит к подавлению глобальной неустойчивости сверхзвуковой недорасширенной струи, затягиванию перехода к турбулентному течению и увеличению длины сверхзвукового участка. В этом случае предел дальнобойности сверхзвуковой недорасширенной струи определяется уже конвективной неустойчивостью слоя смешения.

Список литературы:

1. Powell A. Nature of the feedback mechanism in some fluid flows producing sound // *Acoustica*. 1953. V.3. No. 4. P. 233–243.
2. Tam C. K. W., Seiner J. M., Yu J. C. Proposed relationship between broadband shock associated noise and screech tones // *J. Sound Vibration*. 1986. V. 110. No. 2. P. 309.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда
(грант № 17-19-01157)*

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В ДИНАМИЧЕСКИ НЕРАВНОВЕСНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЯХ

Михеев Н.И., Саушин И.И., Душин Н.С., Шакиров Р.Р.

Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН,
420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31

Процессы турбулентного переноса теплоты и импульса чувствительны к динамическому воздействию на поток в виде продольного градиента давления и нестационарности потока. При таком воздействии набор чисел динамического подобия расширяется: для градиентных течений добавляется число подобия, характеризующее ускорение потока или градиент давления (параметры Клаузера, Кейса), а для пульсирующих потоков – два числа подобия, характеризующие максимальное ускорение (градиент давления) и период его изменения.

Безразмерный градиент давления (параметр Клаузера) характеризует отношение сил давления к силам

трения: $\beta = \frac{\delta^*}{\tau_w} \frac{dP}{dx}$, где δ^* – толщина вытеснения, τ_w –

касательное напряжение на стенке, dP/dx – градиент статического давления. Условием формирования равновесного пограничного слоя является постоянство параметра Клаузера на протяженном участке стенки не менее 5...10 толщин пограничного слоя. Этого постоянства достигают специальным профилированием канала. При условии $\beta = \text{const}$ на протяженном участке стенки профили средней скорости и турбулентных пульсаций для одинаковых β являются подобными. Максимум пульсаций значительно увеличивается с ростом β , но при всех значениях этого параметра положение максимума находится вблизи координаты, соответствующей толщине вытеснения. Если же параметр Клаузера изменяется по продольной координате, пограничный слой становится неравновесным. В таких течениях профили пульсаций скорости существенно искажаются по сравнению со случаем $\beta = \text{const}$, с увеличением β проявляется тенденция к образованию двух максимумов: при $Y^+ = 10...20$ и в средней по толщине области пограничного слоя.

Интересным классом неравновесных течений являются пульсирующие потоки, в которых скорость потока и связанный с ней градиент давления периодически изменяются. В них профили скорости и турбулентности, начиная с некоторых относительных частот вынужденных колебаний, не успевают подстроиться под текущий градиент давления.

В данной работе предпринята попытка экспериментального определения и сопоставления характеристик турбулентности в динамически неравновесном пограничном слое, формирующемся при стационарном течении в диффузоре и при пульсациях потока в каналах постоянного сечения. Для пульсирующего течения для анализа выбирались данные в фазе максимального положительного градиента давления при торможении потока.

Исследовались характеристики турбулентности в пограничном слое, формирующемся в условиях стационарного течения в диффузорном канале и пульсирующего потока в канале постоянного сечения. Исследования диффузорного течения выполнялись в асимметричном диффузорном канале прямоугольного сечения с углом раскрытия 5 градусов. Пульсирующий поток создавался в канале постоянного сечения, в котором скорость потока на оси канала изменялась по близкому к гармоническому закону: $u = U(1 + a \sin(2\pi f t))$. Относительная амплитуда a варьировалась в диапазоне 0.10–0.44, а частота вынужденных колебаний потока f от 5 до 100 Гц.

На основе измерений динамики векторных полей скорости потока методом Smoke Image Velocimetry (SIV) [1] определялись профили средней скорости потока, корреляций $u'u'$, $u'v'$, $v'v'$ и некоторых других характеристик турбулентности потока. Для стационарного потока в диффузоре использовались стандартные методы разделения на осредненные и пульсационные значения компонент скорости потока. Для пульсирующего же потока из осциллограмм скорости потока для некоторой точки пространства выделялись составляющие средней скорости, вынужденных колебаний и турбулентных пульсаций в каждой фазе вынужденных колебаний.

Установлено, что в диффузорном канале с увеличением параметра Клаузера происходит все более заметное перераспределение энергии турбулентности по толщине пограничного слоя. При $\beta = 5.9$ максимум среднеквадратичных пульсаций продольной компоненты увеличился вдвое по сравнению с безградиентным течением, а положение максимума сместилось на порядок дальше от стенки.

В пульсирующем потоке при малом мгновенном положительном значении параметра Клаузера интенсивность турбулентных пульсаций не только не увеличивается, но и несколько снижается (при $\beta = 0.3$ – до 2 раз в области $Y^+ = 40...80$) по сравнению со стационарным потоком. При соизмеримых больших положительных $\beta \approx 5$ разница в интенсивности пульсаций при изменении β по координате и по времени становится многократной.

Таким образом, в неравновесном пограничном с переменным параметром Клаузера по пространственной координате или времени происходит существенная перестройка профилей турбулентности по сравнению с равновесным градиентным течением при таком же параметре Клаузера.

Список литературы:

1. Mikheev N.I. et al. Estimation of turbulent energy dissipation in the boundary layer using Smoke Image Velocimetry // Exp. Fluids. – 2017. – Vol. 58. No. 8, P. 97.

АНИЗОТРОПИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ И МОМЕНТЫ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА В БЛИЖНЕМ СЛЕДЕ ПОПЕРЕЧНОГО КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА

Молочников В.М.^{1,2}, Михеев Н.И.¹, Михеев А.Н.¹, Саушин И.И.¹

¹ Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН, 420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31

² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, 420111, Россия, Казань, ул. К. Маркса, 10

В настоящее время интенсивное развитие получили вихреразрешающие методы численного моделирования турбулентных отрывных течений (DNS, LES, DES). Одной из причин, побуждающих исследователей обратиться к этим методам, является неудовлетворенность результатами применения для расчета таких течений осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с различными моделями замыкания (RANS и URANS). Тем не менее, и вихреразрешающие методы требуют тщательного тестирования по надежным экспериментальным данным. Результаты опытов, в которых детально описывались бы условия их проведения, явно недостаточно. Кроме того, в этих данных чаще всего отсутствует информация о трехмерной анизотропии турбулентных пульсаций и моментах третьего порядка пульсаций скорости потока в следе, важность оценки которых была отмечена еще в работе Townsend [1]

В настоящих исследованиях представлены результаты SIV измерений [2] мгновенных векторных полей скорости потока в ближнем следе цилиндра при $Re=3900$. Эксперименты проводились в установке с рабочим участком прямоугольного поперечного сечения шириной 150 и высотой 115 мм (рис.1). Цилиндр диаметром $d=15$ мм был установлен на расстоянии 60 мм от входа в участок. Измерения проводились в плоскости xu и в плоскости xz , параллельной образующей цилиндра, в шести сечениях следа. По данным SIV измерений выполнена оценка распределений компонент средней скорости потока и их турбулентных пульсаций, а также моментов третьего порядка пульсаций скорости потока в следе цилиндра.

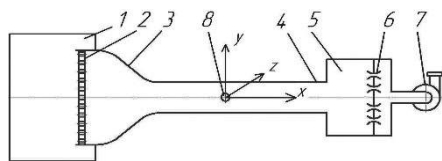


Рис. 1. Схема установки: 1 – камера подготовки дыма; 2 – хонейкомб; 3 – сопло; 4 – рабочий участок; 5 – ресивер; 6 – герметичная перегородка с набором критических сопел; 7 – осевой вентилятор; 8 – цилиндр.

Получено представление о степени анизотропии составляющих пульсаций $\langle u^2 \rangle$, $\langle v^2 \rangle$, $\langle w^2 \rangle$ в различных областях следа. Пульсации компонент скорости потока по координате z оценивались на оси ближнего следа и в области его внешней границы. Установлено, что наибольшая анизотропия пульсаций в окрестности оси следа наблюдается при $x/d=2$, т.е. в области

формирования вихрей Кармана, а на границе следа – в непосредственной близости от цилиндра.

Получены распределения тройных корреляций в различных сечениях следа. Пример таких распределений показан на рис.2.

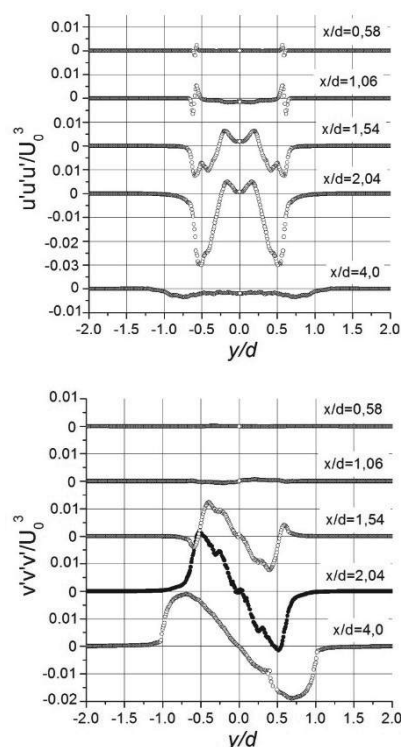


Рис. 2. Тройные корреляции пульсаций скорости потока в следе цилиндра.

Установлено, что рост уровня тройных корреляций наблюдается в области начала формирования вихрей Кармана, причем самый высокий уровень корреляций имеет место при $x/d \approx 2$, где вихри Кармана полностью сформировались и имеют наибольшую скорость поперечного (в направлении оси y) движения.

Список литературы:

1. Townsend A. A. The structure of the turbulent boundary layer // Math. Proc. Cambridge Philosophical Society. – Cambridge University Press, 1951. – Т. 47. – №. 2. – С. 375–395.
2. Mikheev N.I. et al. Estimation of turbulent energy dissipation in the boundary layer using Smoke Image Velocimetry // Exp. Fluids. – 2017. – Vol. 58. No. 8, P. 97.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-41-160022)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И ВЛАГООБМЕНА В ПРЯМОТОЧНЫХ МЕМБРАННЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ

Наумкин В.С., Низовцев М.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Для снижения энергозатрат на отопление и кондиционирование зданий всё шире начинают применяться регенеративные и рекуперативные теплообменники. При вентилировании помещений при температурах наружного воздуха меньше $t < 0^{\circ}\text{C}$ остро стоит проблема обмерзания трактов теплообменника. Для предотвращения данного явления может применяться предварительный нагрев воздуха, подаваемого с улицы, байпасирование, уменьшение температурного КПД теплообменника, либо предварительная осушка отводимого из помещения воздуха.

Одним из способов удаления водяного пара из тракта с осушаемым воздухом служит применение в качестве поверхности теплообмена селективно проницаемой мембраны, пропускающей водяной пар.

В зимний период времени из-за разности влагосодержания воздуха в помещение подаётся преимущественно сухой воздух, который необходимо увлажнять до комфортных значений. Полупроницаемые мембраны позволяют увлажнить сухой воздух, подаваемый в помещение, влагой из удаляемого воздуха. Большинство работ посвящённых данной тематике рассматривают мембранные теплообменники как осушители воздуха в летний период. Вопрос об увлажнении входного воздуха в холодный период практически не рассматривался.

В работе были рассмотрены процессы тепло- и влагообмена в прямоточном мембранном теплообменнике (рис. 1). Высота каналов устройства составляла 2 мм, длина 300 мм. В верхний канал подавался воздух с улицы, в нижний воздух из помещения. Скорости потоков парогазовой смеси были одинаковы в обоих каналах и равнялись $u=1$ м/с.



Рис. 1. Схема течения влажного воздуха в мембранном прямоточном теплообменнике.

Течение газовой смеси внутри каналов рассматривалось в приближении узкого канала. Уравнения движения в данном случае сходны с уравнениями пограничного слоя. Поток проникшего пара через мембрану определялся по разнице парциальных давлений водяного пара с одной и другой стороны теплообмена. Давление насыщенных паров определялось по формуле Гоффа-Грэтча. Свойства парогазовой смеси рассчитывались по полиномиальным зависимостям. В расчётах учитывалась возможная конденсация водяного пара на мембране со стороны тракта с воздухом, покидающим помещение. При возникновении конденсации, поток во-

дяного пара к мембране определялся из закона сохранения массы. Влияние плёнки конденсата на процессы тепломассообмена не учитывалось. Было проведено сопоставление данных численного моделирования с данными других авторов по температурной эффективности. Получено удовлетворительное согласование данных.

Для зимнего периода времени. В обоих каналах теплообменника давление равно атмосферному, и перенос влаги через мембрану осуществляется только за счёт различной начальной концентрации водяного пара, поэтому поток водяного пара, вызванный разницей парциальных давлений паров над и под мембраной, гораздо меньше потока, возникающего вследствие конденсации водяного пара (Рис. 2). Мембрана не справляется с отводом конденсируемой влаги, и в нижнем канале, даже при достаточной большой проницаемости мембраны, пары водяного пара достигают состояния насыщения, и на мембране начинает образовываться плёнка конденсата. Отличие в потоках пара к мембране, вызванных конденсацией и разницей парциальных давлений составляет три порядка. Поток пара при конденсации уменьшается по длине от величины $\sim 10^{-4}$ до $\sim 10^{-6}$ кг/м²с. В то время как поток пара, вызванный разницей парциальных давлений, равен $\sim 10^{-7}$ кг/м²с. В данном случае производительность мембраны (коэффициент проницаемости $\sim 10^{-11}$) не позволяет полностью отводить влагу из воздуха для того, чтобы предотвратить возникновение конденсации.

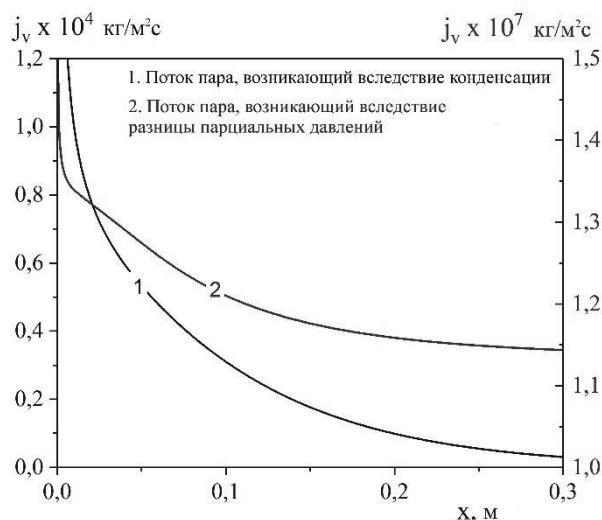


Рисунок 2. Изменение потока пара по длине теплообменника (1) при конденсации, (2) из-за разницы парциальных давлений в трактах теплообменника.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА В УЗКОМ КАНАЛЕ МЕТОДОМ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ

Палкин Е.В.¹, Мулляджанов Р.И.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Потоки жидкости и газа в достаточно узких зазорах с характерной глубиной меньше продольных размеров широко распространены в окружающей среде и инженерных приложениях, таких как теплообменники [1], системы охлаждения, природные явления [2]. В данной работе численно при помощи метода крупных вихрей (LES) исследуется поток воздуха, обтекающий цилиндр диаметром D и высоты $H=0.4D$, помещённый внутри широкого прямоугольного канала в диапазоне чисел Рейнольдса от 1000 до 10000, вычисленному по среднерасходной скорости и диаметру цилиндра. На входе расчётной области задан параболический профиль скорости, а на стенках канала и цилиндра – линейное распределение температуры. Мы используем конечно-объёмный код со вторым порядком аппроксимации по времени и пространству. Подсеточные масштабы моделируются с помощью динамической модели Смагоринского [3].

Рис. 1 показывает изоповерхности Q -критерия для визуализации типичных вихревых структур для разных чисел Рейнольдса. Для относительно низкого $Re < 3000$ поток оказывается стационарным с системой подковообразных вихрей в передней части цилиндра. С дальнейшим увеличением Re поток теряет устойчивость и становится турбулентным в следе, а система подковообразных вихрей становится нестационарной. Помимо системы подковообразных вихрей и дорожки Кармана в дальнем следе видны продольные вихревые структуры на границе между свободным потоком и следом за цилиндром [4]. Для больших Re ламинарный режим подковообразных вихрей сменяется на турбулентный [5]. В полнотекстовом докладе будет проведён корреляционный анализ влияния вторичных вихревых структур на поле скорости и температуры вместе с методом главных компонент (POD).

Список литературы:

1. Mon MS., Gross U. Numerical study of fin-spacing effects in annular-finned tube heat exchangers // Int. J. Heat Mass Transf. 2004. Т. 47. № 8–9, С. 1953–1964.
2. Ingram RG., Chu VH. Flow around islands in Rupert Bay: An investigation of the bottom friction effect // J. Geophys. Res.: Oceans. 1987. Т. 92, № 13, С. 14521–14533.
3. Lilly DK. A proposed modification of the Germano subgrid - scale closure method // Phys. Fluids. 1992. Т. 4 № 3, С. 633–635.
4. Zeng J., Constantinescu G. Flow and coherent structures around circular cylinders in shallow water // Phys. Fluids. 2017. Т. 29, С. 066601.
5. Kirkil G., Constantinescu G. Effects of cylinder reynolds number on the turbulent horseshoe vortex system and near wake of a surface-mounted circular cylinder // Phys. Fluids. 2017. Т. 27, С. 075102.
6. Авторы благодарны Сибирскому суперкомпьютерному центру, межведомственному суперкомпьютерному центру РАН и информационному вычислительному центру НГУ за предоставленные вычислительные ресурсы.

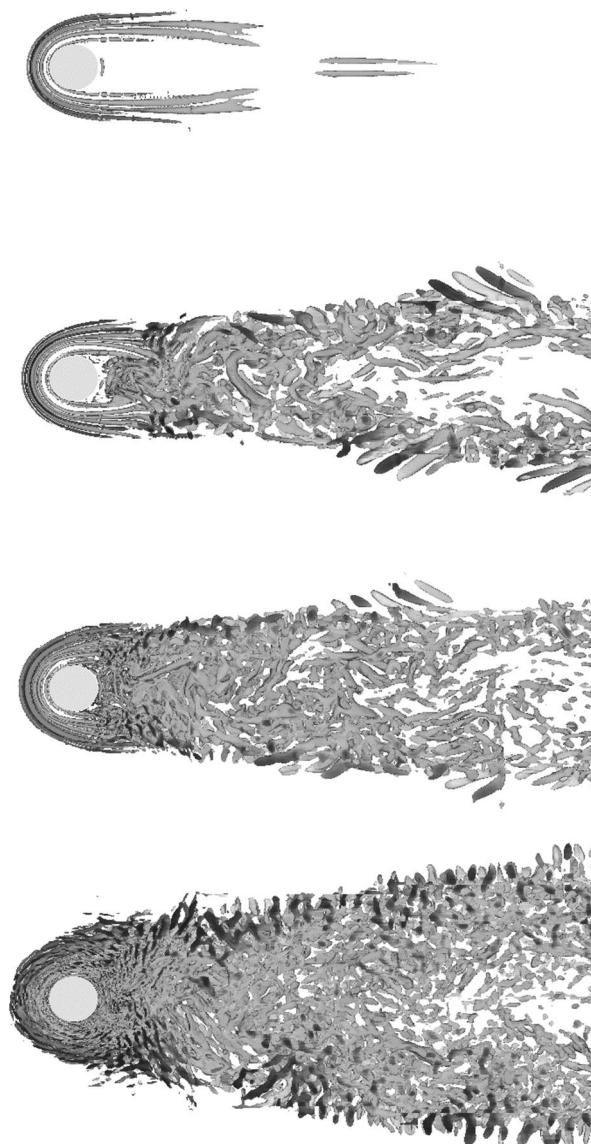


Рис. 1. Вид сверху на поток, натекающий слева направо. Поле температуры на изоповерхностях мгновенного Q -критерия. Сверху вниз: $Re=2000, 3000, 4000, 10000$.

Авторы благодарны Сибирскому суперкомпьютерному центру, межведомственному суперкомпьютерному центру РАН и информационному вычислительному центру НГУ за предоставленные вычислительные ресурсы.

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 18-38-00943 мол_а, разработка вычислительного кода выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ РОТОРОВ ДЛЯ МАЛОЙ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ

Платонов Д.В.^{1,2}, Дектерев Ал.А.^{1,2}, Дектерев Д.А.^{1,2}, Минаков А.В.^{1,2},
Дектерев Ар.А.², Сентябов А.В.^{1,2}, Лобасов А.С.¹

¹ Сибирский федеральный университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1

Малая гидроэнергетика является перспективным направлением для электрификации отдельно расположенных населённых пунктов, мест добычи полезных ископаемых, экспедиционных лагерей и т.д.

По статистическим данным, для примера, в Красноярском крае не электрифицированы и недостаточно электрифицированы Северная, Приангарская, Южная группы районов. Дефицит электроэнергии здесь составляет не менее 50%. Неудовлетворенная потребность в электроэнергии по Нижнему Приангарью составляет до 150 МВт, а с учетом тенденций развития региона – до 500 МВт. Применение свободнопоточных наплавных и погружных микро- и миниГЭС (МГЭС) может стать решением этих проблем с минимальными экологическими и экономическими затратами.

Необходимо отметить, что экономический потенциал малой гидроэнергетики в условиях нашей географии превышает экономический потенциал таких возобновляемых источников энергии, как ветер, солнце и биомасса вместе взятых. Одним из основных достоинств объектов малой энергетики является их экологическая безопасность. В процессе их сооружения и после дующей эксплуатации обеспечивается сохранение окружающей природы: отсутствуют вредные воздействия результатов строительства на свойства и качество воды и, тем самым, обеспечивается возможность сохранения рыбохозяйственной значимости водоемов, а также источников водоснабжения населения. Несмотря на резко растущий интерес европейских стран на объекты малой гидроэнергетики, в нашей стране, по сравнению с 50-ми 60-ми годами прошлого века, количество единиц объектов МГЭС существенно сократились. Однако, с учетом возможного повышения эффективности, срока службы и снижения стоимости оборудования использование МГЭС может быть выведен, на новый уровень.

В данной работе будет проведено численное моделирование роторов применительно к малой энергетике (рис.1). В нашем случае в качестве ротора был выбран винт Архимеда. За рубежом микроГЭС на их

принципе устанавливаются на обводных каналах и небольших реках, русло, которых частично или полностью пропускается через шнек. Возможность использования шнековых роторов в свободнопоточных наплавных микроГЭС описывается в единичных статьях и остается практически неизученной.

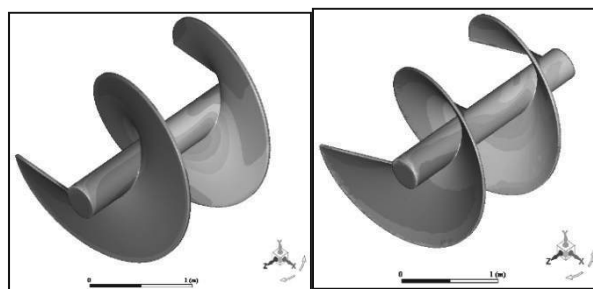


Рис. 1. Варианты геометрии шнековых роторов.

Планируется провести исследования геометрических особенностей шнеков и способов их установки в поток (рис.2).

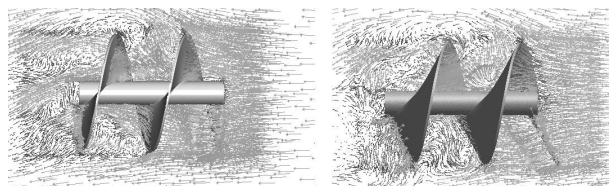


Рис. 2. Векторное поле скорости в центральном сечении ротора.

По результатам численных исследований планируется изготовить опытный образец и провести серию экспериментов, с применением PIV-методики, для сравнения с результатами численного моделирования и более глубокого понимания структуры течения.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке
РФФИ и Правительства Красноярского края
в рамках научного проекта № 18-48-242007*

ДИНАМИКА ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ПЕРЕХОДОВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ В НАКЛОНЯЕМОМ КВАДРАТЕ

Полудницин А.Н.¹, Шарифуллин А.Н.²

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Россия, Пермь, ул. Букирева, 15

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Россия, Пермь, Комсомольский пр., 29

Тепловая конвекция воздуха в замкнутых наклоняемых прямоугольных полостях интересна в связи с тем, что подобные замкнутые прямоугольные объемы являются элементами большого количества разнообразных технических устройств. Их ориентация в ряде случаев плавно или ступенчато меняется, а в газе, заполняющем объем, конвективные течения и обусловленные ими потоки тепла претерпевают скачкообразные изменения, что может привести к техногенной катастрофе.

Наклон полости при малых значениях числа Рэлея приводит к формированию нормального вихря, направление циркуляции которого, совпадает с направлением угла наклона полости. Если числа Рэлея превышают критическое значение, то в результате изменения наклонов полости появляется гистерезис конвективного течения. Это означает, что в определенном ограниченном диапазоне изменения углов наклона наряду с нормальным вихрем может существовать и вихрь с обратным направлением циркуляции, который принято называть аномальным. При превышении углом наклона критического значения происходит переход к нормальному режиму конвекции. Такие переходы ранее наблюдались лишь экспериментально [1].

В работе приводятся результаты исследования конечно-разностным методом динамики гистерезисных переходов ламинарного конвективного течения при наклонах квадрата с твердыми границами для случая идеально теплопроводных боковых стенок [2]. Установлено, что переходной процесс может происходить по одному из двух сценариев. Первый характеризуется быстрым ростом одного из диагональных вихрей (вихря Моффата) [3, 4], что приводит к подавлению аномального вихря (рис. 1).

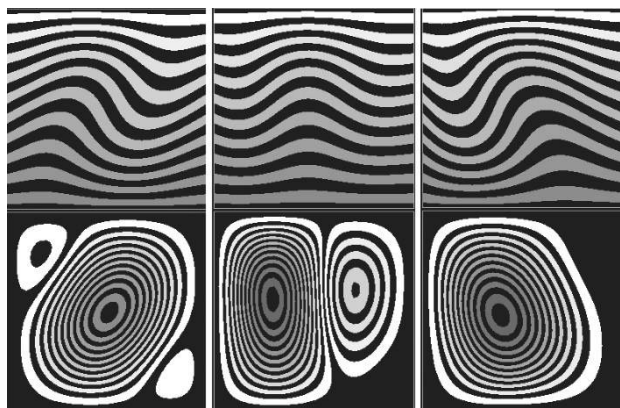


Рис. 1. Верхний ряд – изотермы, нижний ряд линии тока.

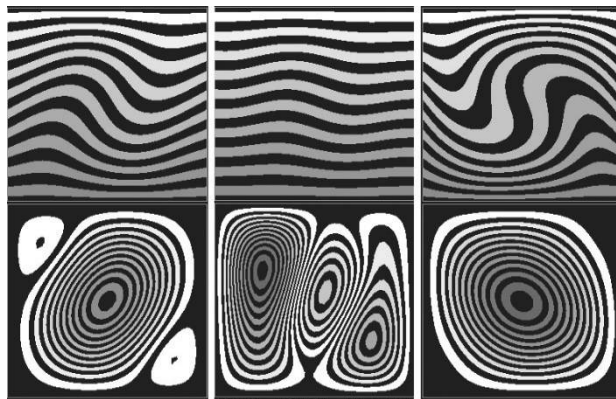


Рис. 2. Верхний ряд изотермы, нижний ряд линии тока.

Во втором сценарии в подавлении аномального вихря участвуют два диагональных вихря (рис. 2). Различаются эволюции величин тепловых потоков через грани квадрата. Описан процесс перестройки вихревой структуры аномального конвективного течения и представлены изменения тепловых потоков в течение перехода.

Список литературы:

1. Шарифуллин А.Н., Полудницин А.Н. Экспериментальное определение пределов существования аномального конвективного течения в наклоняемом кубе // Прикладная механика и техническая физика. – 2014. – Т. 55. – № 3 (325). С. 103–112.
2. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Тарунин Е.Л. Численное исследование конвекции жидкости подогреваемой снизу // Изв. АН СССР. МЖГ. 1966. № 6. С. 93–9.
3. Moffat H.K. Viscous and resistive eddies near a sharp corner // J. Fluid Mech. 1964. V.18 P.1–18.
4. Mizushima J. Onset of the Thermal Convection in a Finite Two-Dimension Box // J. Physical Society of Japan. 1995. V. 64. № 7. P. 2420–2432.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект No.3.6990.2017/8.9)

Разуванов Н.Г., Лучинкин Н.А., Сардов П.А.

Объединённый институт высоких температур Российской Академии наук (ОИВТ РАН)
125412, Россия, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2

В качестве теплоносителя в ряде проектов экспериментальных модулей blankets международного термоядерного реактора (ТЯР) ИТЭР, рассматриваются жидкие металлы (ЖМ), главным образом это литий – свинцовая эвтектика Pb–Li, которая является теплоносителем и средой для наработки трития [1].

Закономерности гидродинамики и теплообмена ЖМ в условия ТЯР существенно отличаются от условий традиционной ядерной энергетики. Главным отличием является магнитогидродинамический (МГД) характер течения среды в условиях сильного внешнего магнитного поля, что сопровождается подавлением турбулентности, специфической формой профилей скорости и ростом гидравлических потерь на прокачку теплоносителя поперек линий магнитной индукции.

Исследование особенностей теплообмена при течении ЖМ трубах и каналах применительно к системам охлаждения ТЯР проводится на базе ртутного МГД стенда ОИВТ РАН.

В ранних исследованиях при *опускном* течении в обогреваемых трубе и канале [2] обнаружено сильное влияние встречной термогравитационной конвекции (ТГК) на исследуемые характеристики теплообмена. В поперечном (компланарном) магнитном поле формирование и развитие вторичных вихревых структур ТГК в ряде режимов течения приводил к ряду неожиданных эффектов, существенно влияющих на осредненные и пульсационные характеристики теплоотдачи.

В настоящее время рассматривается конфигурация подъемного течения ЖМ в вертикальной трубе и в прямоугольном канале (соотношение сторон 3/1) в поперечном (компланарном) магнитном поле. На стенде зондовыми методами проведены измерения полей температуры и скорости в условиях однородного (двухстороннего) и неоднородного (одностороннего) обогрева как в поперечном сечении трубы (каналы), так и по длине участка обогрева. Получены данные по полям осредненной температуры и скорости, распределениям температуры стенки, статистическим пульсационным характеристикам в диапазоне чисел Рейнольдса $10000 \div 90000$, Грасгофа Gr до 5×10^8 и числам Гартмана до 800.

При *подъемном* неизотермическом течении ЖМ также обнаружено существенное влияние ТГК на характеристики теплоотдачи, как в отсутствие, так и при наличии поперечного (компланарного) МП. Неоднородность обогрева приводит к существенным

неоднородностям в распределениях температуры на стенках каналов. Наличие ТГК в магнитном поле не приводит к полному подавлению турбулентности в условиях эксперимента, а в некоторых режимах наблюдался рост пульсаций температуры. При этом числа Нуссельта не снижались с ростом числа Гартмана, оставаясь на уровне турбулентных значений.

Результаты опытных данных сопоставляются с результатами численного моделирования в соответствующих эксперименту условиях.

Обнаруженные в исследовании эффекты, необходимо учитывать в инженерных расчетах при конструировании ЖМ модулей blankets термоядерных реакторов.

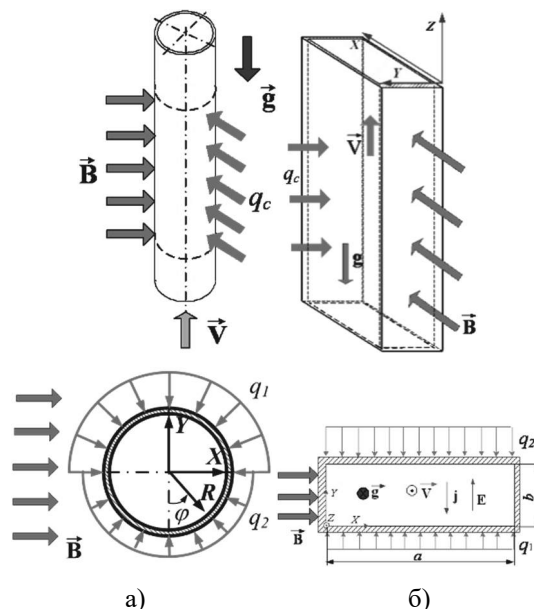


Рис. Исследуемые конфигурации течения и обогрева ЖМ в МП: а) в трубе, б) в канале.

Список литературы:

1. Лешуков А.Ю., Данилов И.В., Капышев В.К., Карташев И.А. и др. Результаты расчетно-конструкторских работ по испытательному модулю blankets с керамическим бриддером и литий-свинцовой эвтектикой // ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 2013. Т. 36. Вып. 3. С. 3–25.
2. Костычев П.И., Поддубный И.И., Пятницкая Н.Ю., Разуванов Н.Г., Свиридов Е.В. Особенности теплообмена при течении жидкого металла в вертикальном канале в компланарном магнитном поле // ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 2017. Т. 40. Вып. 3. С. 68–77.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛИЖНЕЙ ОБЛАСТИ ЗАКРУЧЕННОЙ КОЛЬЦЕВОЙ СТРУИ

Рыженьков В.О.^{1,2}, Мулладжанов Р.И.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Имея достаточно простую геометрическую конфигурацию (два соосных цилиндра), кольцевые струйные течения обладают практически значимыми особенностями. Например, за телом обтекания реализуется область возвратного течения. Это явление используется в горелочных устройствах, где обратный поток способствует лучшему перемешиванию реагентов, а также установлению более равномерного распределения температуры, что обеспечивает наиболее стабильный режим горения и снижает уровень вредных выбросов в атмосферу [1].

При добавлении закрутки происходит явление «распада вихря». Оно заключается в том, что под действием центробежной силы формируется зона пониженного давления на оси струи, которая приводит к снижению продольной компоненты скорости. В зависимости от параметра закрутки различают несколько режимов течения: при слабой закрутке скорость на оси падает, но остаётся положительной; при умеренных числах наблюдается перемежаемость, когда мгновенная продольная скорость принимает отрицательные значения, но осредненная по времени величина строго положительна; при высоких значениях образуется зона рециркуляции. Для кольцевых струй при средних значениях закрутки наблюдается две зоны рециркуляции (за телом обтекания и «распад вихря»), которые объединяются при дальнейшем увеличении азимутальной скорости [2].

При помощи современных методов статистического анализа можно построить низкоразмерную модель течения. Одним из таких методов является Собственное ортогональное разложение (от англ. Proper Orthogonal Decomposition POD), при помощи которого можно выделить когерентные составляющие из общей нелинейной динамики потока [3]. Это достигается путем разложения корреляционной матрицы скоростей на правые и левые сингулярные вектора (от англ. Singular Value Decomposition SVD). В итоге мы получаем пространственные векторы, задающие распределение когерентных структур в потоке, временные коэффициенты, определяющие их эволюцию во времени, и собственные значения, соответствующие вкладу в общий бюджет турбулентной кинетической энергии. Анализ течения кольцевых и круглых струй с применением этого метода показывает наличие спиральных и двойных спиральных когерентных структур, доминирующих в потоке [4, 5].

В данной работе при помощи вычислительного кода Nek5000 [6] проводится моделирование методом крупных вихрей уравнений Навье-Стокса, которые описывают течение несжимаемой турбулентной кольцевой струи при числе Рейнольдса $Re=8900$ и числе закрутки в диапазоне $S=0.3-0.6$. Постепенное увеличение закрутки позволяет составить карту ре-

жимов течения и проследить их эволюцию, а применение метода POD – изучить пространственные и временные характеристики крупномасштабных вихревых структур, а также определить характерную длину волны и частоту вращения мод вокруг оси симметрии. На основании этих данных составляется низкоразмерная модель течения в ближней области струи.

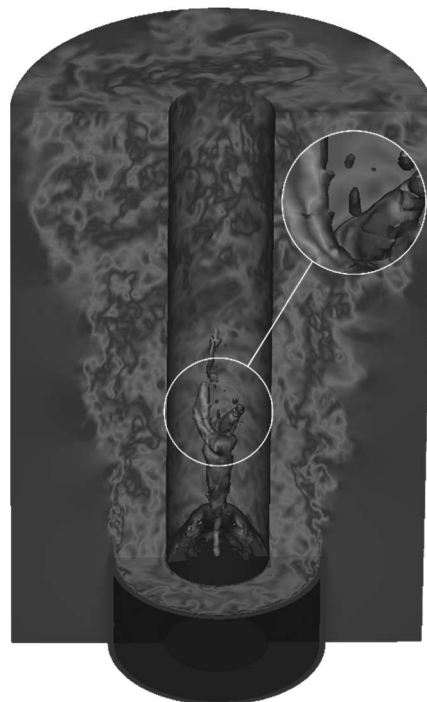


Рис. 1. Визуализация мгновенной (внешний объем) и осредненной по времени (пузырь за телом обтекания) продольной скорости. Также показана изоповерхность мгновенного давления и образование второго рециркуляционного пузыря.

Список литературы:

1. Taglia C.D. 2003. Numerical investigation of the non-reacting unsteady flow behind a disk stabilized burner with large blockage. Ph.D. thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
2. Sheen H.J. et al. 1996. Recirculation zones of unconfined and confined annular swirling jets. AIAA J. 34, 572–579.
3. Sirovich L. 1987. Turbulence and the dynamics of coherent structures. Quart. J. Appl. Math. 45, 561–590.
4. Oberleithner K. et al. Three-dimensional coherent structures in a swirling jet undergoing vortex breakdown: stability analysis and empirical mode construction. J. Fluid Mech. 679: 383, 2011.
5. Vanierschot M. et al. Double helix vortex breakdown in a turbulent swirling annular jet flow. Phys. Rev. Fluids 3: 034703, 2018.
6. Fischer P.F. et al. 2008. Nek5000. webpage: <https://nek5000.mcs.anl.gov>.

Работа поддержана грантом
Российского Научного Фонда № 19-79-30075

РЕАЛИЗАЦИЯ АВТОМОДЕЛЬНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ ПРОДОЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ

Саушин И.И., Михеев Н.И., Гольцман А.Е.

ИЭПТ ФИЦ КазНЦ РАН
420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31

Исследование турбулентного пограничного слоя с продольным градиентом давления является одной из актуальных современных научных и практических задач. Однако, структура такого пограничного слоя определяется не только величиной градиента давления, но и структурой потока верх по течению, что существенно увеличивает размерность пространства подобия процесса. Реализация автомодельного пограничного слоя с продольным положительным или отрицательным градиентом давления при нормализации характеристик с помощью соответствующих локальных шкал позволяет изучать влияние лишь одного безразмерного градиента давления на когерентную область пограничного слоя.

По аналогии с автомодельным безградиентным турбулентным пограничным слоем в автомодельном пограничном слое с продольным градиентом давления вдоль по потоку должно сохраняться подобие профилей скорости и напряжений Рейнольдса, записанных в координатах закона стенки [1]. Таким образом, должно выполняться постоянство произведения целого комплекса характеристик подобия, охватывающих продольное изменение касательного напряжения τ , толщины потери импульса δ^* , градиента давления dP/dx или скорости dU/dx . Одним из таких наиболее широко используемых параметров является безразмерный градиент давления β , предложенный в работе Клаузера [2]

$$\beta = \frac{\delta^*}{\tau_w} \frac{dP}{dx}. \quad (1)$$

На первый взгляд, одним из простых способов реализации автомодельного пограничного слоя с продольным градиентом давления является выполнение предложенной Townsend [3] степенной зависимости изменения скорости U_e на внешней границе пограничного слоя

$$U_e(x) = Bx^m, \quad x \geq 0, \quad (2)$$

однако, здесь встает вопрос об определении параметров B и m . Значение постоянной B можно легко найти, приняв $x=0$, а с показателем степени m , являющейся функцией от β , возникает главная неопределенность данного подхода. К примеру, полученная из интеграла импульсов функциональная зависимость $m(\beta)$ [4]

$$m = -\frac{\beta}{1+3\beta}, \quad (3)$$

плохо согласуется [5] с результатами экспериментов, так как согласно [1] автомодельность пограничного

слоя на стенке канала определяется не только изменением площади поперечного сечения, но и существенно зависит от угловых течений Прандтля II-го рода и пограничных слоев на трех других стенках канала.

Тем не менее, в ряде работ [1, 6] удалось реализовать в рабочем участке экспериментальной установки автомодельный пограничный слой с продольным градиентом давления. Автомодельность была достигнута с помощью подвижной гибкой верхней крышки канала, форма контура которой подбиралась на основе большого числа сложных и трудозатратных измерений в пограничном слое на нижней гладкой стенке. В [1] для упрощения такого подхода была реализована специальная система мгновенной оценки безразмерного градиента давления на основе измерения полевым оптическим методом PIV.

К настоящему моменту времени нет четкого понятия о методах проектирования канала на стенках которого был бы реализован турбулентный пограничный слой с продольным положительным градиентом давления.

В данной работе были проанализированы все известные подходы к реализации такого пограничного слоя при проведении экспериментов, на основе полученных результатов и проведенного численного моделирования предпринята попытка формулировки требуемого степенного закона изменения скорости для реализации участка пограничного слоя с постоянным значением β .

Список литературы:

1. Atkinson C., Buchner A. J., Eisfelder M. Kitsios V., Soria, J. Time-resolved PIV measurements of a self-similar adverse pressure gradient turbulent boundary layer // In Proceedings of the 18th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal. 2016.
2. Clauser F.H. Turbulent boundary layers in adverse pressure gradients // Journal of the Aeronautical Sciences. 1954. 21(2). P. 91–108.
3. The structure of turbulent shear flow / A.A.R. Townsend. Cambridge: Cambridge university press. 1980. 416 p.
4. A first course in turbulence / H. Tennekes, J.L. Lumley, J. L. Lumley. Cambridge: MIT press. 1972. 300 p.
5. Вигдорович И.И. Автомодельный турбулентный пограничный слой с градиентом давления. Четыре режима течения // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2014. Т. 146(5). С. 1062–1089.
6. Skaare P.E., Krogstad P.Å. A turbulent equilibrium boundary layer near separation // Journal of Fluid Mechanics. 1994. 272. P. 319–348.

ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ПЕРЕХОДЫ РЕЖИМОВ СТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ В КВАДРАТНОЙ ПОЛОСТИ С ДВИЖУЩЕЙСЯ СТЕНКОЙ

Ступникова А.В., Шарифулин А.Н.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Россия, Пермь, пр. Комсомольский, 29

Экспериментальное и теоретическое изучение бифуркаций стационарных режимов тепловой конвекции в замкнутой полости актуально для предсказания смен режимов, как в технологических процессах, так и для предсказания природных катастроф.

Со времен работы Релея по конвекции в горизонтальном слое сложился подход, заключающийся в рассмотрении устойчивости тепловой конвекции в полостях простой геометрической формы: горизонтальных и вертикальных плоских слоях и бесконечных цилиндрах для условий подогрева, когда возможно состояния механического равновесия. Нарушение условий механического равновесия приводит к качественному изменению бифуркационной картины. К настоящему времени хорошо изучено влияние наклона полости, ее вибраций. Важно с точки зрения приложений изучить влияние движения одной из стенок полости. Такой способ нарушения условий механического равновесия практически не исследован. Имеется лишь работа [1], где показано, что движение верхней стенки квадратной полости приводит к разрушению вилочной бифуркации.

Пусть вязкая несжимаемая жидкость заполняет бесконечный горизонтальный цилиндр квадратного сечения (см. рис.1). Исследование влияния циклического плавного изменения от скорости верхней стенки, т.е. числа Рейнольдса, показало, что для каждого надкритического значения числа Грасгофа существует предельное значение числа Рейнольдса $Re^*(Gr)$ такое, что при изменении числа Рейнольдса внутри интервала $|Re| < Re^*(Gr)$ течение перестраивается плавно, меняя структуру от одновихревого к двухвихревого и обратно. Если же изменение числа Рейнольдса выходит за указанный интервал (см. рис.2), происходят жесткие гистерезисные скачкообразные переходы, показанные стрелками.

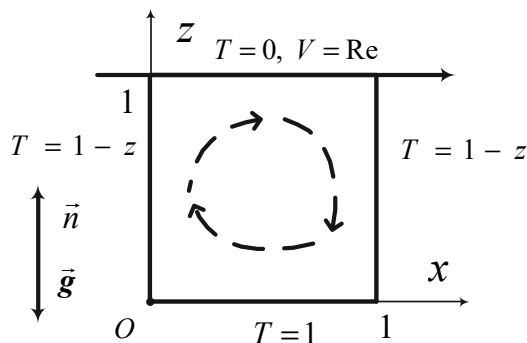


Рис. 1. Геометрия задачи о свободной тепловой конвекции в горизонтальном цилиндре квадратного сечения с движущейся верхней стенкой.

Верхняя и нижняя грани поддерживаются при заданных температурах, а вертикальные боковые идеально теплопроводны. Верхняя стенка может двигаться с постоянной скоростью в поперечном к оси цилиндра направлении. Обезразмеривание скорости ее движения по высоте полости и коэффициенту кинематической вязкости позволяет ввести один из критериев задачи, – число Рейнольдса Re . В случае отсутствия движения верхней стенки, т.е. при $Re = 0$ задача переходит в хорошо исследованную задачу о конвекции в подогреваемой снизу квадратной полости с идеально теплопроводными стенками, определяемую двумя критериями подобия, – числом Грасгофа Gr и числом Прандтля Pr . При $Re = 0$ в полости возможно состояние механического равновесия, которое теряет устойчивость при достижении числом Релея $Ra = Gr \cdot Pr$ критического значения $Ra_{cr} = 5012$ [2].

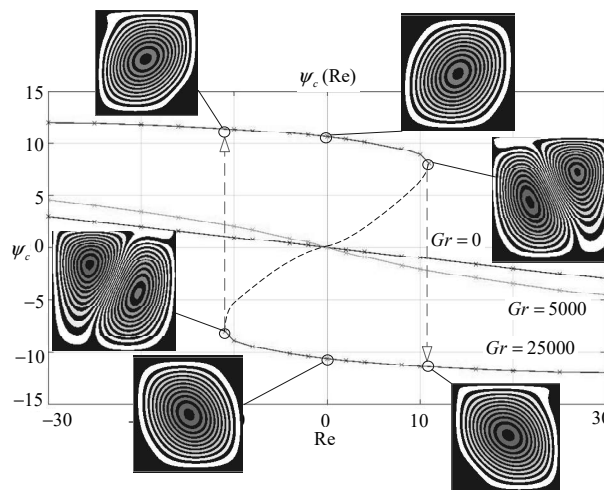


Рис. 2. Зависимость функции тока ψ_c в центре полости от числа Рейнольдса, изменяемого в интервале $(-30, 30)$ для трех различных значений числа Грасгофа.

Список литературы:

1. Тарунин Е.Л. Вычислительный эксперимент в задачах свободной конвекции. Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та, 1990. 223 с.
2. Mizushima, J. Routes to unicellular convection in a tilted rectangular cavity / J. Mizushima, Y. Hara // J. Physical Society of Japan. 2000. V. 69. № 8. P. 2371–2374.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства образования и науки Российской
Федерации (проект No.3.6990.2017/8.9)

ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ В МОДЕЛИ ОТСАСЫВАЮЩЕЙ ТРУБЫ ГИДРОТУРБИНЫ

Суслов Д.А.^{1,2}, Литвинов И.В.^{1,2}, Шторк С.И.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Перед современной гидроэнергетикой стоит задача расширения диапазона стабильной и надежной эксплуатации ГЭС. При нерасчетных и неоптимальных режимах работы гидротурбины за рабочим колесом могут возникать опасные гидродинамические неустойчивости в виде нестационарных вихревых явлений. При этом, в литературе почти не содержится данных о их влиянии на вихревые явления переходных режимов работы гидротурбины (старт/стоп турбины, регулирование).

В настоящей работе исследуются пульсации давления, вызванные прецессирующим вихревым ядром (ПВЯ) в конусе модели отсасывающей трубы (ОТ) гидротурбины, в условиях стационарной нагрузки, так и при моделировании переходных режимов.

Исследования проводились в модельных условиях на аэродинамическом стенде. С помощью комбинации лопаточных завихрителей, один из которых неподвижен, а другой вынуждено вращается, меняя частоту вращения завихрителя n , об/мин или расход продуваемого воздуха Q , м³/ч, имитируются различные распределения скорости на входе в ОТ, моделируя таким образом режимы работы гидротурбины [1].

В каждом режиме лазерным доплеровским анемометром (ЛДА) измерялись профили скорости аксиальной и тангенциальной компоненты, проведен анализ влияния частоты вращения ротора на параметр крутки потока и максимальную амплитуду в спектре пульсаций тангенциальной скорости в центре ОТ. Показано, что зависимость рассчитанного из профилей скорости параметра крутки от режимных параметров стенда согласуется с аналитической оценкой из работы [2] до значения интегрального параметра крутки 0.5. Дальнейшее увеличение скорости вращения не приводит к линейному росту параметра крутки, т.к. происходит вырождение эффекта ПВЯ. Такие режимы соответствуют режимам сильной неполной нагрузки на реальных ГЭС.

Для стационарных режимов построена карта пульсаций давления с помощью акустических датчиков. При помощи карты найдены частоты вращения завихрителя и расходы, при которых возникает ПВЯ. На основе данных, представленных параметрически-

ми зависимостями, были выбраны начальные и конечные параметры переходного процесса. Рассмотрен внезапный (быстрый) переход от частичной загрузки турбины ($Q=0,51Q_c$) до точки наивысшей эффективности турбины ($Q=Q_c$) и обратно (см. рис. 1).

Используя непрерывное вейвлет-преобразование, найдены характерные времена образования ПВЯ и установления режима течения при изменении управляющих параметров работы установки. Для анализа измеренных сигналов акустических датчиков и ЛДА проведено условное осреднение реализаций, полученных при многократном повторении переходных режимов.

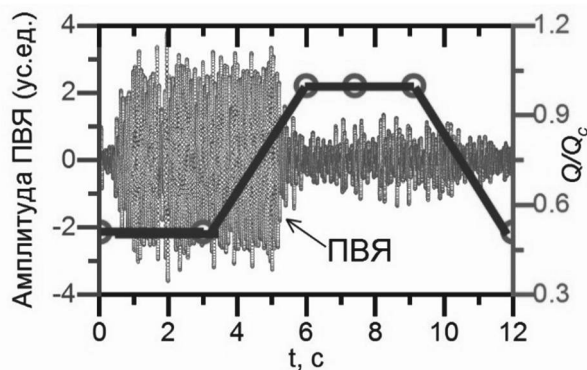


Рис. 1. Пример развития пульсаций давления от ПВЯ при переходном режиме (расход от $0,51Q_c$ до Q_c , время перехода – 3 с).

Список литературы:

1. I. Litvinov, S. Shtork, E. Gorelikov, A. Mitryakov, K. Hanjalic. Unsteady regimes and pressure pulsations in draft tube of a model hydro turbine in a range of off-design conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, volume 91, 2018, pages 410–422.
2. Favrel, A. T., Gomes Pereira Junior, J., Landry, C., Müller, A., Nicolet, C., & Avellan, F. (Accepted/In press). New insight in Francis turbine cavitation vortex rope: role of the runner outlet flow swirl number // *Journal of Hydraulic Research*, 1–13.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке
РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-01467*

ВЛИЯНИЕ ДЕФЛЕКТОРА НА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ

Терехов В.И.^{1,2}, Дьяченко А.Ю.^{1,2}, Смутьский Я.И.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Задача изучения тепломассопереноса в отрывных течениях за обратным уступом к настоящему времени стала классической, но интерес к ней не ослабевает в силу недостаточно полной изученности трехмерного поля течения и сложного теплообмена. Важной причиной, стимулирующей развитие данного направления науки, является поиск методов управления теплообменом в отрывных потоках. Пассивные методы управления отрывом за уступом являются наиболее технологически простыми. В этом случае внутри отрывного потока размещаются дополнительные элементы в виде поперечных ребер, трехмерных табов и других генераторов вихрей. Индуцированные преградами продольные вихри оказывают существенное влияние на масштаб рециркуляционной области за уступом [1, 2]. При этом поперечное ребро, установленное перед уступом, в зависимости от места его расположения приближает или отдаляет точку отрыва и соответственно максимум теплоотдачи. Механизм воздействия трехмерных преград (табов) является более сложным по сравнению с двумерными ребрами и их воздействие заключается в основном в разрушении застойной зоны непосредственно за уступом [3].

В работе изучалось влияние вихрегенератора-дефлектора на интенсивность теплоотдачи в отрывном течении за уступом. Дефлекторы имели форму прямолинейного и скругленного ребра и устанавливались они над кромкой уступа (Рис. 1).

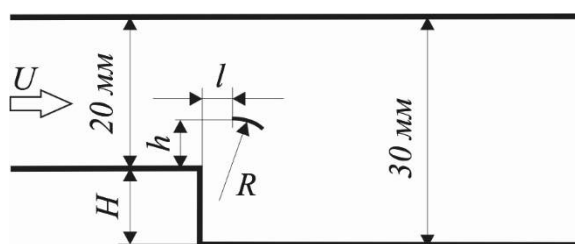


Рис. 1. Схема рабочего участка.

Эксперименты проводились в канале длиной 1 м с прямоугольным сечением размером 20×150 мм. На расстоянии 600 мм от входа в канал находился обратный уступ с постоянной высотой $H=10$ мм. На нижней стенке канала за обратным уступом размещался тепловой участок длиной 400 мм. В качестве отклоняющего элемента были использованы стальное ребро высотой $\Delta=3$ мм толщиной 0,5 мм и три разновидности отклоняющих лопаток, сделанные из стальных полосок шириной 8 мм, с радиусами кривизны $R=6, 15$ и $28,5$ мм. Расстояния от стенки канала h и от края уступа l до дефлектора в экспериментах варьировались. Числа Рейнольдса $Re=U H/\nu$, рассчитанные по высоте уступа H и среднерасходным скоростям U , были в диапазоне 5 000–15 000. На рассто-

янии от входа, равном 25 калибрам, профиль скорости был близок к степенному распределению с показателем степени $n \approx 1/7$.

На рис. 2 продемонстрированы распределения локального числа Nu для шести случаев влияния отклоняющего элемента для $Re=5000$. Дефлектор с $R=6$ мм (кривая 2) отклоняет поток к уступу, максимальная теплоотдача находится на 2, 3 калибрах, дальнейшее снижение обусловлено взаимодействием аэродинамического следа от дефлектора с пограничным слоем.

Исследованные в работе эффективные с точки зрения среднеинтегрального числа Nu дефлекторы имеют достаточно большое гидравлическое сопротивление. Для ребра высотой $\Delta=3$ мм, установленного на расстоянии 2 мм от уступа (кривая 6) при $Re=5000$ гидравлическое сопротивление на 85% больше, чем для случая с гладким уступом. В докладе будут рассмотрены влияние отклоняющего элемента на локальную и среднюю теплоотдачу, гидравлическое сопротивление и энергоэффективность.

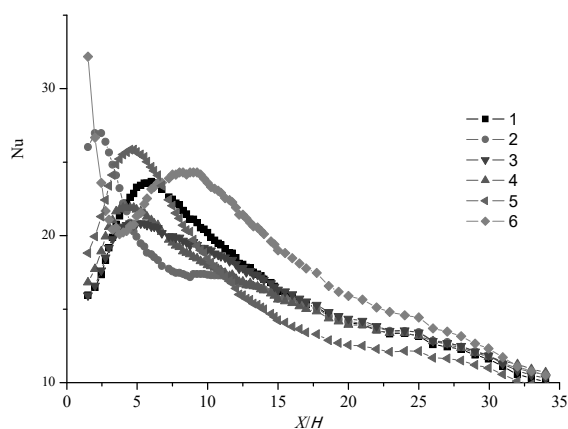


Рис. 2. Профили числа Nu для $Re=5000$: 1 – уступ без дефлектора; дефлекторы: 2 – $R=6$ мм, $h=3$ мм, $l=2$ мм; 3 – $R=15$ мм, $h=3$ мм, $l=2$ мм; 4 – $R=28,5$ мм, $h=3$ мм, $l=2$ мм; 5 – $R=28,5$ мм, $h=7$ мм, $l=2$ мм; 6 – отклоняющий элемент виде ребра $\Delta=3$ мм, $h=3$ мм, $l=2$ мм.

Список литературы:

1. Терехов В.И., Смутьский Я.И., Шаров К.А. Экспериментальное исследование структуры отрывного течения за уступом при наличии пассивного возмущения // ПМТФ. 2016. Т. 57, № 1, С. 207–215.
2. Терехов В.И., Смутьский Я.И. Экспериментальное исследование теплообмена при взаимодействии двух отрывных потоков различного масштаба. // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 5. С. 156–164.
3. Park H., Jeon W.-P., Choi H., Yoo J.Y. Mixing enhancement behind a backward-facing step using tabs // Phys. Fluids 2007. V. 19. 105103.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-58-00011) и средств Минобрнауки РФ (гос. рег. № AAAA-A17-117030310010-9)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КРУГЛЫХ СТРУЙ

Филиппов М.В., Чохар И.А., Терехов В.В., Терехов В.И.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Система из двух и более параллельных турбулентных круглых струй является достаточно широко распространенной конфигурацией в технических приложениях. В ряде работ, например [1], показано, что система из нескольких струй имеет преимущества по сравнению с одиночной, такие как ускорение смещения или уменьшение уровня создаваемого шума. С точки зрения понимания физики взаимодействия между отдельными струями, логично рассматривать парное взаимодействие.

Несмотря на то, что одиночная круглая турбулентная струя детально изучена, для системы из двух струй все аспекты взаимодействия струй досконально не исследованы. В работах [2, 3] отмечается «интерференция» двух струй, т.е. подавление уровня турбулентности на оси каждой из струй за счет межструйного взаимодействия. В работе [4] отмечены особенности структуры течения двух параллельных струй при фиксированном числе Рейнольдса и вариации расстояния между соплами, проведено сопоставление структуры течения в такой системе со струей, распространяющейся параллельно плоской поверхности.

В настоящей работе представлены данные экспериментального исследования структуры течения двух струй при различных числах Рейнольдса и расстояниях между осями струй, а также взаимодействие двух струй с разными числами Рейнольдса.

Исследования проводились с помощью двухкомпонентного лазерно-доплеровского анемометра с адаптивной временной селекцией вектора скорости. Струи создавались с помощью сопел с диаметром $D=10$ мм при расстоянии между осями $s/D=1.8-3.0$. Расход воздуха через сопла задавался таким образом, чтобы обеспечить необходимое число Рейнольдса из диапазона $Re=5000-11000$. Измерения средних и пульсационных компонент вектора скорости проводены в диапазоне расстояний от сопла $H/D=0-25$. Среднее количество достоверных частиц в каждой точке по каждой компоненте измерения составляло около 5000.

На рис. 1а представлены характерные для начального участка профили осевой компоненты скорости и ее пульсаций. Можно видеть, что взаимодействие струй при этом минимально. На рис. 1б представлены профили на большем расстоянии от сопел, где взаимодействие струй является существенным. Следует отметить качественное отличие в распределении турбулентных пульсаций, характерное для вырождения слоев смешения между струями. Для данного числа Рейнольдса полное слияние струй и характер

течения близкий к одиночной струе наблюдается при $z/D \sim 20$.

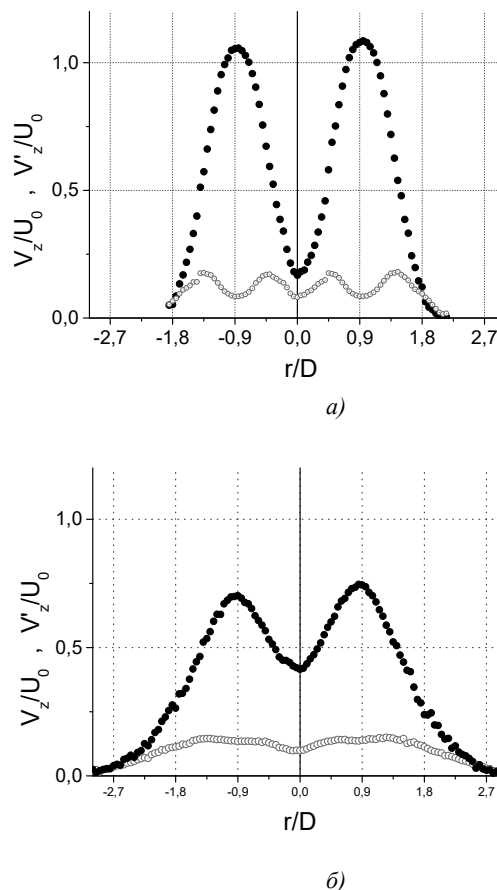


Рис. 1. Профили осевой скорости и ее пульсации на начальном участке взаимодействия струй. $Re=5500$, $s/D=1.8$, а) $z/D=2.5$, б) $z/D=7.5$. Темные точки – средняя осевая скорость, светлые – ее пульсация.

Список литературы:

1. Raghunathan S., Reid I.M. A study of multiple jet// AIAA J. 1981. 19. P. 124–127.
2. Tanaka E. The interference of two-dimensional parallel jets: 1st report, experiments on dual jet// Bull. JSME. 1970. 13. P. 272–280.
3. Harima T., Fujita S., Osaka H. Turbulent properties of twin circular free jets with various nozzle spacing// In: Rodi, W., Mulas, M. (Eds.) Engineering Turbulence Modelling and Experiments 6, Elsevier Science BV, Amsterdam, 2005. P. 501–510.
4. Nasr A., Lai J.C.S. Two parallel plane jets: mean flow and effects of acoustic excitation// Experiments in Fluids. 1997. 22. P. 251–260.

Работа выполнена при финансовой поддержке
РФФИ (грант № 18-08-00986)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КРУГЛЫХ СТРУЙ МЕТОДОМ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ

Филиппов М.В., Чохар И.А., Терехов В.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Изучение взаимодействия параллельных турбулентных струй обусловлено, с одной стороны, широчайшим спектром технических приложений, с другой, отсутствием окончательной теории, которая позволила бы описать все аспекты этого взаимодействия.

Изучению одиночной струи посвящено большое количество работ, основные выводы по которым сформулированы в соответствующих обзорах, например [1]. Для системы из двух параллельных круглых струй информации существенно меньше, что обусловлено, кроме прочих факторов, появлением дополнительных параметров задачи: расстояния между соплами, соотношением расходов и соотношением диаметров для системы из неодинаковых струй. Следует отметить экспериментальные работы [2–3], в которых выявлено подавление турбулентности на оси каждой из струй вследствие взаимодействия между ними. Примером успешного применения вихререшающих методов (PANSURANS) для схожей задачи взаимодействия параллельных струй создаваемых соплами с прямоугольным сечением может служить работа [4].

В настоящей работе представлены результаты моделирования методом крупных вихрей системы из двух струй с числом Рейнольдса 5500 и несколькими расстояниями между осями струй в диапазоне 1.8–3.0.

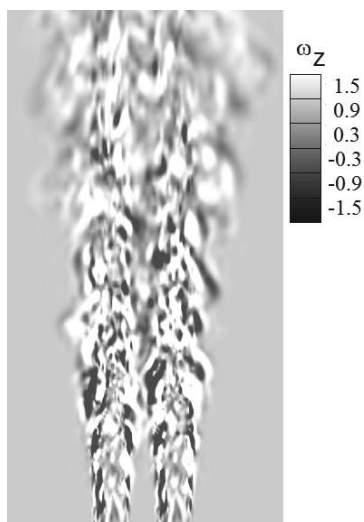


Рис. 1. Распределение мгновенной продольной компоненты вектора завихренности (безразмерной). $Re=5500$. $s/D=1.8$.

Моделирование проводилось на базе вычислительного кода разработанного авторами. Он основан на конечно-разностном решении уравнений Навье-Стокса методом расщепления второго порядка точности по времени. По пространству уравнения дискретизовались с четвертым порядком точности. В качестве подсеточной модели использовалась модель Смагоринского. В качестве граничного условия на

выходе из сопел принималось полностью развитое течение в круглой трубе с соответствующим числом Рейнольдса, для чего проводились предварительные расчеты по той же самой методике. Характерный размер сетки для расчета входных условий ~500 тыс. ячеек, для основного моделирования взаимодействия струй – до 6 млн. Шаг по времени ограничивался числом Куранта $Co < 0.7$.

Начальный этап расчета (до того, как струи достигнут выхода из расчетной области) составлял $4L/U$, где L – продольный размер рассматриваемой области распространения струи. Характерное мгновенное распределение продольной компоненты завихренности представлено на рис. 1. На втором этапе проводилось осреднение в течении времени $10L/U$ для получения средних значений. Характерная картина распределения средней продольной скорости представлена на рис. 2.

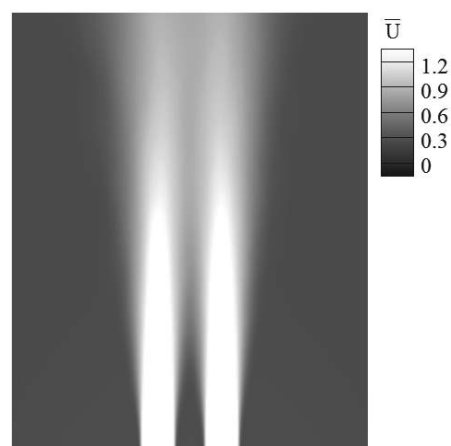


Рис. 2. Осредненное распределение продольной пульсации скорости (безразмерной). $Re=5500$. $s/D=1.8$.

Полученные в результате моделирования данные позволили детально проанализировать влияние расстояния между осями струй на характеристики турбулентности, получить зависимости средних величин, таких как интенсивность затухания струй, положение точки слияния и т.д. Также представлено сопоставление с имеющимися экспериментальными данными.

Список литературы:

1. J. H. W. Lee & V. H. Chu Turbulent jets and plumes A lagrangian approach/ Norwell, Massachusetts, U.S.A., Kluwer Academic Publishers, 2003, 359 p.
2. Tanaka E. The interference of two-dimensional parallel jets: 1st report, experiments on dual jet// Bull. JSME. 1970. 13. P. 272–280.
3. Okamoto T. et al. Interaction of twin turbulent circular jet// Bull. JSME. 1985. 28. P. 617–622.
4. Han L., Anand N. K., Hassan Y.A. Computational Study of Turbulent Flow Interaction between Twin Rectangular Jets// Transactions of the American Nuclear Society. 2005. 117. P. 1653–1656.

Работа выполнена при финансовой поддержке
РФФИ (грант № 18-08-00986)

ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ТЕЧЕНИИ РЕАГИРУЮЩЕЙ СМЕСИ

Французов М.С.^{1,2}, Александров В.Ю.¹

¹ Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова,
111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

Неотъемлемой частью перспективных силовых и энергетических установок является проточный канал сложной геометрической формы. В ходе разработки и создания часто появляется необходимость оценки теплового состояния элементов конструкции рассматриваемого проточного тракта. При сверхзвуковом течении химически реагирующего потока газа в каналах сложной формы определение тепловых потоков затруднено ввиду многообразия протекающих физико-химических процессов. Использование численного моделирования высокого уровня, основанного на применении современных математических моделей, позволяет получать решения сложных физических явления и определять на их основе значения таких интегральных характеристик как тепловые потоки.

В настоящей работе представлены результаты определения конвективного и лучистого теплового потока в плоском канале сложной формы, в котором были реализованы два режима течения дозвуковой и сверхзвуковой. Математическое моделирование осуществлялось на основании решения уравнений Навье-Стокса с замыканием моделью турбулентности Spalart-Almaras и моделью химической кинетики Hong, Hanson и т.д. В канале рассматривается сверхзвуковое течение воздушного потока, при спутной подаче газообразного водорода. На выходе из канала сложной формы подбиралось противодавление, которое определяло режим течения в канале. На верхней и нижней стенке канала была задана температура

800 К. Расчет лучистого теплового потока осуществлялся по методу дискретных ординат.

В результате проведенного исследования в широком диапазоне изменения коэффициентов избытка окислителя, реализуемого в канале, установлены распределения конвективного и лучистого теплового потока. Анализ полученных результатов показал, что суммарная тепловая нагрузка больше в случае возникновения теплового заклинивания, при этом характер распределения теплового потока достаточно плавный, увеличивающийся от места подачи водорода до его полного выгорания. Для режима теплового заклинивания выявлено, что суммарная доля лучистого теплового потока не превосходит значения в 20% от суммарного в рассматриваемом диапазоне изменения коэффициента избытка окислителя. В случае сверхзвукового режима течения распределение конвективного и лучистого теплового потока носит неоднородный неравномерный характер. Такое распределение отражает газодинамическую структуру течения, со взаимодействующими скачками уплотнения со стенкой. Кроме того, в случае сверхзвукового режима течения доля лучистого теплового потока становится соизмерима с конвективной составляющей, что вызвано неравномерным распределением продуктов сгорания по проточному тракту. Проведенное исследование показало, что лучистый тепловой поток вносит существенный вклад в общую тепловую нагрузку, особенно при реализации полностью сверхзвукового режима сгорания в канале сложной формы.

РАЗВИТИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ ЗАТОПЛЕННЫХ МИКРОСТРУЯХ НЕРАВНОВЕСНОГО ЭЛЕГАЗА

Цырюльников И.С., Анискин В.М., Миронов С.Г.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

В струйных сверхзвуковых микротечениях многоатомных газов могут возникать физические эффекты, связанные с проявлением внутренних степеней свободы молекул, которые приводят к изменениям в газодинамической структуре струи, развитию возмущений и переходе к турбулентному течению. Особенности таких микротечений могут найти применение в задачах управления макротечениями, тепловой защиты поверхностей, интенсификации процесса смешения и создания устройств локального теплового воздействия. В данной работе выполнено численное и экспериментальное исследование влияния колебательного возбуждения и релаксации молекул SF_6 на газодинамическую структуру и устойчивость высокоскоростных микроструй истекающих из осесимметричных конвергентных микросопел.

Численное моделирование истечения газа с учетом колебательной релаксации молекул было проведено с помощью пакета ANSYS Fluent на базе решения уравнений Навье-Стокса с использованием двухтемпературной модели релаксационных течений. По этой модели температура колебательных степеней свободы может не совпадать с температурой поступательно-вращательных степеней свободы. Предполагается, что поступательная и вращательная моды находятся в равновесии, поэтому вместо уравнения сохранения полной энергии фактически записываются два релаксационных уравнения: для поступательно-вращательной и колебательной энергии. Учет энергообмена между колебательными и поступательными степенями свободы с конечным временем релаксации производился добавлением источникового члена, вычисляемого из уравнения Ландау-Теллера аналогично [1]. Время колебательной релаксации SF_6 вычислялось по данным из [2]. Расчеты проводились в трехмерной LES и DNS постановке для различных диаметров конвергентных микросопел в диапазоне 13, 75–110 мкм при истечении в затопленное пространство с нерасчетностью $n=1, 363$ и различных температурах торможения T_0 . Рассматривался как неравновесный, так и равновесный случай истечения, в котором теплоемкость газа принималась функцией температуры. На рис.1 показан пример численной шлирен-визуализации (интегральной в z -направлении у-компоненты градиента плотности) расчетов неравновесной (а) и равновесной (б) сверхзвуковой струи SF_6 , истекающей из сопла диаметром $d=55$ мкм при $n=1, 363$ и $T_0=600$ К.

Эксперименты были выполнены на струйном стенде ИТПМ СО РАН, в котором моделировалось истечение микро-струй шестифтористой серы по нерасчетности и числу Рейнольдса. С помощью трубки Пито измерялись осевые распределения P_0' в модельных микроструях. получены данные о газодинамической структуре, размерах области сверхзвукового участка течения, а также числу Рейнольдса ламинарно-турбулентного перехода. Проведено сопоставле-

ние данных, полученных для модельных струй с данными численного моделирования микроструй.

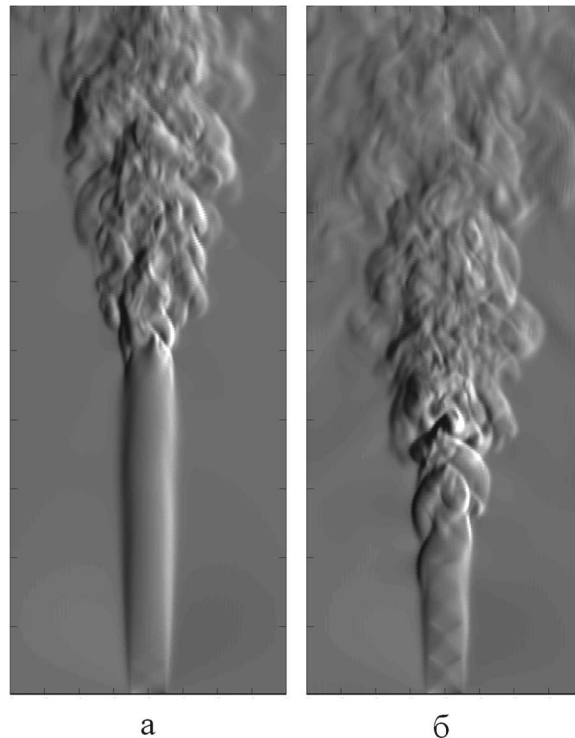


Рис. 1. Численная шлирен-визуализация данных расчета неравновесной (а) и равновесной (б) сверхзвуковой струи SF_6 , истекающей из сопла диаметром $d=55$ мкм при $n=1,363$ и $T_0=600$ К.

Было получено, что для рассматриваемых условий наблюдается влияние колебательной релаксации газа как на газодинамическую структуру микроструй, так и на интенсивность возмущений и скорости их роста в слое смешения. Количество и продольные размеры газодинамических ячеек, а также интенсивность пульсаций давления в ближнем поле течения у неравновесных струй меньше, чем у равновесных. Это приводит к увеличению числа Рейнольдса перехода к турбулентному течению и увеличению длины сверхзвукового участка по сравнению с равновесным газом.

Список литературы:

1. Кириловский С.В., Маслов А.А., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С. Влияние колебательной релаксации на развитие возмущений в ударном слое на пластине // ЖТФ 2015, Т. 85, № 5, С. 12–22.
2. Breshears W.D., Blair L.S. Vibrational relaxation in polyatomic molecules: SF_6 // J. Chem. Phys. 1973. V. 59, No. 11. P. 5824–5827.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда
(проект № 17-19-01157)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В НАКЛОННОЙ ТРУБЕ

Черныш Д.Ю., Бирюков Д.А., Беляев И.А.

Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2

Использование жидкометаллических теплоносителей, таких как натрий, свинец, литий, в ядерных и перспективных термоядерных установках является актуальным направлением в современной энергетике. В настоящее время существует большое количество проектов реакторных установок, где в качестве теплоносителя выступают жидкие металлы: БН, БРЕСТ, СВБРВ и др. Применение жидкометаллического охлаждения (на основе литья) в бланкетных модулях термоядерного реактора дает возможность наработки энергии. Кроме того, в некоторых проектах солнечной энергетики, например, в солнечных коллекторах, имеет место применение в теплообменных каналах натриевого теплоносителя. В связи с этим актуальной инженерной задачей является грамотное и теплофизически обоснованное проектирование каналов теплообменных систем, исключающее возможность возникновения аварийных ситуаций, связанных с их разрушением. Помимо выбора подходящих по заданным параметрам линейных размеров самих каналов так же необходимо подобрать правильную геометрию и их ориентацию в пространстве для наиболее эффективного распределения тепловой нагрузки. Таким образом, экспериментальное исследование течения жидкого металла в каналах различной геометрии и ориентации дает возможность понять принципиальную особенность и дать научное обоснование использования той или иной конфигурации.

В данной работе описывается экспериментальное исследование теплообмена при опускном турбулентном течении жидкого металла (ртуть) в трубе различными конфигурациями обогрева: однородный, неоднородный. Эксперименты проводились при нескольких значениях углов наклона канала относительно вертикали на экспериментальном стенде РК-3 «HELMET» [1]. Зондовым методом были измерены поля температурные поля. На их основе были построены распределения безразмерной температуры стенки по периметру сечения трубы и другие зависимости, отражающие влияние угла наклона на теплообмен.

В опытах с неоднородным обогревом реализованы режимы при разных соотношениях обогрева «сверху/снизу». Для характеристики неоднородности обогрева вводится коэффициент:

$$k = (q_n - q_v) / (q_n + q_v) \quad (1)$$

где q_n – тепловой поток на нижней образующей, q_v – тепловой поток на верхней образующей. В режимах с однородным обогревом $k=0$, с обогревом преимущественно снизу $k > 0$, а в режимах с обогревом преимущественно сверху $k < 0$ [2].

На Рис. 1 показана исследуемая конфигурация и расположение нагревателей на поверхности трубы.

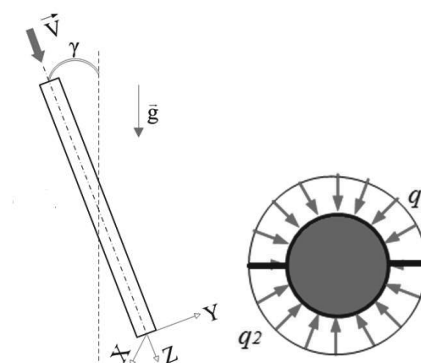


Рис. 1. Схема исследуемой конфигурации.

На Рис. 2 показан максимальный перепад безразмерной температуры стенки по периметру сечения канала для отклонения 15, 45 и 90 градусов относительно вертикали ($Re=10^4$, $Gr_q=0.5 \times 10^8$, $q_{cp}=25 \text{ кВт/м}^2$). Как видно из графика, преобладание тепловой нагрузки в верхней части трубы ($k < 0$) сильнее отражается на распределении температурного поля по сечению. В то время как угол наклона канала сильно не влияет максимальный перепад безразмерной температуры стенки.

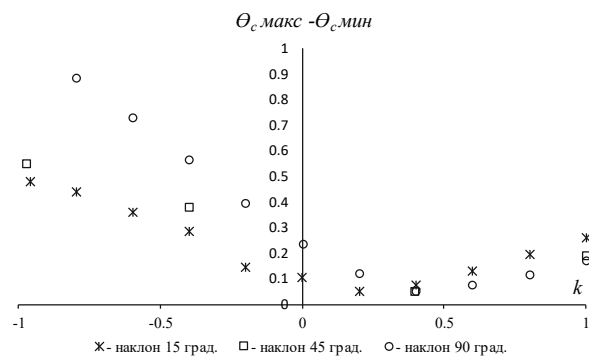


Рис. 2. Максимальный перепад безразмерной температуры стенки по периметру сечения канала для различных углов отклонения относительно вертикали ($Re=10^4$, $q_{cp}=25 \text{ кВт/м}^2$).

Список литературы:

1. Д.Ю. Черныш, Н.А. Лучинкин, И.А. Беляев. Экспериментальное исследование теплообмена при смешанной МГД-конвекции жидкого металла в наклонном канале. // Тепловые процессы в технике. – 2018. – Т.10. No. 3–4. – С. 101–106.
2. Беляев И.А. Исследование МГД-теплообмена в наклонных каналах применительно к перспективной ядерной энергетике // Дис. канд. техн. наук. – М., 2015. – 172 с.

Шмелев Е.И., Свешников Д.Н., Куликов Д.А., Логинов А.В.

АО «ОКБМ Африкантов»,
603074, г. Н. Новгород, Бурнаковский проезд, 15

Гидродинамические силы, возникающие при обтекании потоком теплоносителя поверхностей конструкций реакторных установок, приводят к вибрации конструкций.

В ряде случаев, подобные нагрузки, неблагоприятно сказываясь на прочности и усталостной долговечности конструкции, в конечном счете, могут привести к ее разрушению. Как правило, случаи разрушения конструкций подробно анализируются и описываются.

В последнее время наблюдается активное внедрение программных комплексов на базе CFD и FEA программ в практику проектирования конструкций и оборудования реакторных установок. С развитием CFD расчетов появились возможности детального изучения процессов обтекания с численными оценками гидродинамических сил, действующих на конструкцию. Оценки вибронагружения конструкции от потока теплоносителя могут быть выполнены путем решения связанной трехмерной задачи гидродинамики и динамики конструкции. Применение связанных вычислений позволяет на качественно новом уровне оптимизировать на этапе проектирования конструкцию для обеспечения улучшенных ресурсных характеристик элементов оборудования.

В докладе представлены результаты численных и экспериментальных работ для валидации расчетов колебаний упругих элементов оборудования в потоке теплоносителя. В качестве объекта исследования была геометрически простая модель плохобтекаемого тела (см. рис. 1), представляющая собой последовательно установленные два упругих цилиндра в поперечном потоке рабочей среды. Цилиндры имели консольное закрепление и располагались соосно. Рассматривались режимы с числами Рейнольдса Re порядка 10000. Гидродинамика моделировалась с помощью вихререшающих моделей турбулентности.

Исследования гидродинамики течения осуществлялись PIV методом. Также проводились измерения пульсаций давления с использованием датчиков PSCV 106B52. Датчики размещались на стенке канала по высоте в среднем сечении.

В процессе обработки экспериментальных данных анализировались СКЗ значения в диапазоне частот, соответствующем основным динамическим процессам (возбуждение собственных частот колебаний цилиндров и гидродинамических частот обтекания цилиндров) для различных скоростей рабочей среды.

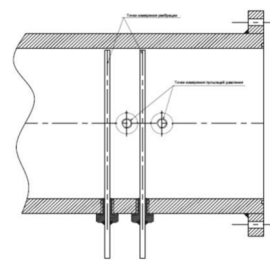
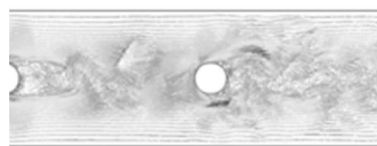


Рисунок 1. Рассматриваемая модель

При CFD расчетах численная модель состояла из гексаэдрических элементов. Граничное условие на выходе из канала задавалось в виде свободного конца со статическим давлением равным нулю. На стенках канала использовалось условие прилипания, скорость на стенке канала выбиралась равной нулю. В качестве модели турбулентности применялась вихререшающая модель турбулентности на базе LES. В процессе работы анализировались поля скоростей (см. рис. 2), пульсации скорости и пульсации давления.

Рисунок 2. Поле скорости при расходе рабочей среды $8 \text{ м}^3/\text{ч}$

Численная конечно-элементная модель, описывающая динамику колебаний цилиндров, включала в себя цилиндры с имитаторами установленных датчиков виброускорений, стенки канала, а также водную среду. Значение первой собственной частоты первого и второго цилиндров составило 96 и 87 Гц соответственно.

Валидация численных расчетов показала, что при использовании модели турбулентности LES гидродинамический расчет и расчет уровней вибрации цилиндров на частоте срыва удовлетворительно совпадает с имеющимися экспериментальными данными. Это свидетельствует о корректности моделирования гидродинамической силы, действующей на цилиндры, в данном частотном диапазоне. При этом связанный расчет уровней вибрации цилиндров для собственной частоты дает завышенные оценки и позволяет проводить качественную оценку влияния гидродинамики на вибрацию конструкций.



СЕКЦИЯ 2

Гидродинамика и теплообмен в многофазных системах



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНУТРИКАНАЛЬНОЙ СЕПАРАЦИИ НА СТРУКТУРУ ПОТОКА КАПЕЛЬ ЗА СОПЛОВОЙ РЕШЕТКОЙ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Алексеев Р.А.¹, Грибин В.Г.¹, Тищенко А.А.¹, Гаврилов И.Ю.¹, Тищенко В.А.¹, Попов В.В.¹

¹ ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»,
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14

Развитие энергетики требует создания паровых турбин большой мощности, обладающих высокими технико-экономическими характеристиками. Большой резерв повышения экономичности и надежности связан с улучшением условий работы лопаточного аппарата влажно-паровых отсеков турбомашин. Наличие жидкой фазы в проточных частях приводит к таким отрицательным эффектам как эрозия и снижение эффективности турбинных ступеней. Применение различного рода сепарационных устройств достаточно эффективный способ решения проблем, связанных с присутствием жидкой фазы в проточных частях паровых турбин.

Крупные капли, формирующиеся при срыве водяной плёнки с поверхности сопловых лопаток, служат основной причиной эрозии лопаточного аппарата и источником дополнительных потерь в турбинной ступени. Такие системы влагоудаления позволяют эвакуировать жидкую плёнку из проточной части и уменьшить количество эрозионно-опасных капель. Эффективное применение внутриканальной сепарации требует наличия данных о структуре парокapельного потока в ступени и влиянии на неё процессов отсоса пароводяной смеси через щели. Не смотря на большой объем исследований этого способа повышения экономичности и надежности турбоагрегатов многие вопросы, связанные с особенностями его работы, остаются открытыми.

Адаптация современных методов лазерной диагностики потоков для изучения течений влажного пара открывает широкие возможности по определению влияния эвакуации влаги на парокapельный поток. В работе [1] описаны результаты комплексного исследования внутриканальной сепарации в сопловой турбинной решетке во влажно-паровом потоке. Определено влияние перепада давлений на сепарационных щелях на количество эвакуируемых из потока жидкости и пара. Оценка воздействия системы влагоудаления на частицы жидкости, движущиеся в кромочном капельном следе, производилась с помощью метода PIV, использующего для получения полей скоростей регулярную сетку. Это обуславливает наличие определенных ограничений по точности и подробности получаемых результатов [2]. В то же время метод PTV позволяет более подробно изучить структуру двухфазного течения и выявить отдельные потоки капель, имеющие различные свойства и происхождение [3].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния внутриканального влагоудаления через щели на вогнутой поверхности лопатки на парокapельный поток за сопловой решеткой. Исследования проводились с помощью системы лазерной диагностики потока "ПОЛИС", в которой был реализован метод PTV. Это

позволило получить подробное представление о потоках капель, движущихся за исследуемым объектом и оценить влияние на них внутриканальной сепарации.

В ходе экспериментов было выявлено наличие двух характерных областей движения крупной влаги за сопловой турбинной решеткой, что согласуется с результатами, полученными в [1]. Одна область соответствует кромочному капельному следу лопатки, а во второй присутствует поток капель, пролетающих межлопаточный канал без взаимодействия с его поверхностями. В потоке частиц жидкой фазы, движущейся во второй области, присутствует как первичная влага, так и влага, образовавшаяся в результате взаимодействия жидкой фазы с входной кромкой лопатки [2]. Эти капли имеют малые скорости движения и покидают решетку под углом, существенно превышающем угол выхода основного потока. Так же во второй области движения крупной влаги присутствует поток жидкости, движущийся с более высокими скоростями и углами выхода, близкими к углам основного потока в кромочном следе лопатки. Эти капли, относятся к влаге, формирующейся при взаимодействии основного потока с жидкой плёнкой на поверхности лопатки, и включение системы эвакуации влаги приводит к существенному снижению их количества.

Для оценки влияния внутриканальной сепарации на структуру парокapельного потока были построены распределения относительного количества крупных капель вдоль шага на расстоянии 10 % от хорды профиля за фронтом сопловой турбинной решетки. Отсев частиц жидкой фазы большого диаметра производился по коэффициентам скольжения. Полученные распределения имели два пика, соответствующих двум областям движения крупной влаги, упомянутым ранее. Включение системы влагоудаления приводит к перераспределению относительного количества крупных частиц между этими потоками. Количество крупной влаги в кромочном следе уменьшается.

Список литературы:

1. Gribin V.G., Tishchenko A.A., Gavrilo I.Yu., et. al. Experimental study of intrachannel separation in a flat nozzle turbine blade assembly with wet stream flow // Power Technology and Engineering, 2016, Vol. 50, No. 2, P. 180-187.
2. Gribin V.G., Gavrilo I.Yu., Tishchenko A.A., et. al. Features of liquid phase movement in the inter-blade channel of nozzle blade cascade // Proceedings of the IMechE, Part A: Journal of Power and Energy, 2018, Vol. 232, No. 5, P. 452-460.
3. Alekseev R.A., Gribin V.G., Tishchenko A.A., et. al. Application of PTV method for investigation of polydisperse wet steam flow // Journal of Physics: Conference Series, 2018, Vol. 1128, conf. 1, Paper .No. 012093.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда
(проект № 16-19-10484)*

УСТОЙЧИВОСТЬ И ТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫЕ СТРУКТУРЫ В СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЕНКЕ ЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ ПОСТОЯННОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА СТЕНКЕ

Актершев С.П., Чиннов Е.А., Шатский Е.Н.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Стационарные термокапиллярные ривулетные структуры в нагреваемой пленке жидкости впервые наблюдались в экспериментах [1, 2] на нагревателе с постоянной температурой стенки. Ривулеты ответвлялись от горизонтального валика на переднем крае нагревателя с некоторым характерным периодом в поперечном к потоку направлении. В последующих экспериментах [3, 4] условия нагрева жидкости соответствовали постоянному тепловому потоку, в то время как температура стенки возрастала вниз по течению. В этих экспериментах обнаружена ривулетоподобная периодическая структура иного типа («типа В»), которая появлялась только в нижней части нагревателя и наблюдалась для различных жидкостей в широком диапазоне числа Рейнольдса пленки $0.1 \leq Re \leq 500$.

В данной работе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования стационарной трехмерной термокапиллярной структуры в локально нагреваемой пленке жидкости. Для описания неизотермического течения пленки мы используем модель, разработанную в [5]. Проведен линейный анализ устойчивости нагреваемой пленки относительно возмущений в поперечном к потоку направлении и получен пространственный инкремент роста этих возмущений вниз по потоку. Численным методом впервые исследовано формирование ривулетоподобной структуры «типа В» на нагревателе с постоянным тепловым потоком на стенке. Результаты расчетов сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными при умеренных значениях числа Рейнольдса Re . На рис. 1 *a* приведена экспериментальная термограмма поверхности пленки 60% раствора глицерина в воде при $Re=2$, на которой видна развитая ривулетоподобная структура «типа В» с периодом 14 мм в нижней части нагревателя. На рис. 1 *b* для сравнения приведено распределение температуры, рассчитанное для условий эксперимента [4] при $Re=2$. Из рисунка видно, что расчет качественно и количественно хорошо согласуется с экспериментальными данными. Период ривулетной структуры в эксперименте хорошо согласуется с результатом линейной теории устойчивости. Так для условий на рис. 1 *a* длина волны максимально растущего возмущения в нижней части нагревателя составляет 14.3 мм.

Расчеты показали, что начальное малое поперечное возмущение сначала затухает вниз по течению в верхней части нагревателя, где стенка является все еще холодной, но затем начинает расти там, где стенка достаточно горячая. В результате ривулетоподобная структура становится видимой только в нижней части нагревателя. В целом, развитие структуры «типа В», рассчитанное для экспериментальных условий, весьма удовлетворительно описывается линейной теорией.

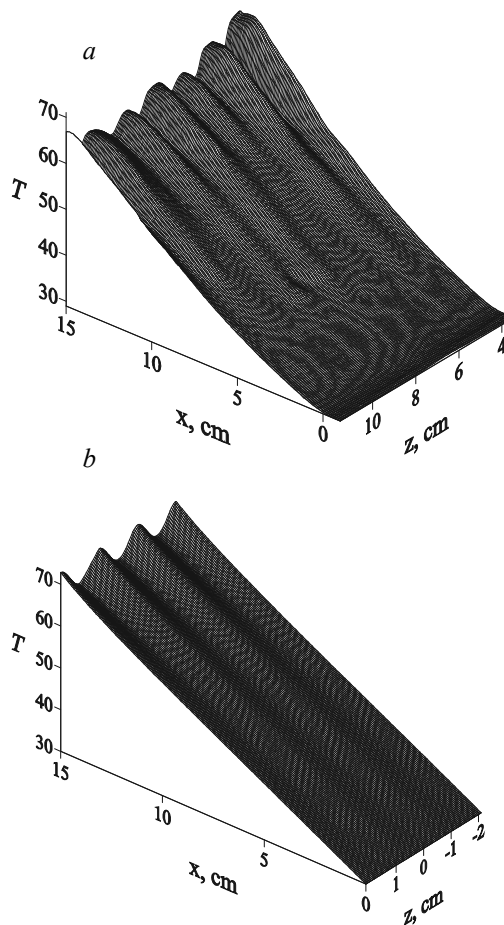


Рис. 1. Температура поверхности пленки 60% раствора глицерина в воде при $Re=2$. Экспериментальная термограмма (*a*) и распределение температуры на поверхности пленки (*b*), рассчитанное для условий эксперимента [4].

Список литературы:

1. Kabov, O. A., Formation of regular structures in a falling liquid film upon local heating // *Thermophys. Aeromech.* 1998. V. 5. P. 547–551.
2. Kabov O. A., Marchuk I. V. and Chupin V. M. Thermal imaging study of the liquid film flowing on vertical surface with local heat source // *Russ. J. Engin. Thermophys.* 1996. V. 6. P. 104–138.
3. Chinnov, E. A. and Kabov, O. A., Jet formation in gravitational flow of a heated wavy liquid film // *J. App. Mech. Tech. Phys.* 2003. V. 44. P. 708–715.
4. Chinnov, E.A. and Shatskii, E.N. Thermocapillary Instabilities in a Falling Liquid Film at Small Reynolds Numbers // *Technical Physics Letters*. 2014. V. 40. P. 7–9.
5. S.P. Aktershev., S.V. Alekseenko. Thermocapillary rivulets in the uniformly heated liquid film // *Journal of Physics: Conference Series* 891 (2017) 012023.

Работа при поддержке гранта РФФ
(проект No. 18-19-00407)

МАНИПУЛЯЦИЯ АНСАМБЛЯМИ МИКРОЧАСТИЦ В ИСПАРЯЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЯХ: ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ И СТОКОВ ТЕПЛА

Аль-Музейкер М., Флягин В.М., Иванова Н.А.

ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет»,
625003, Россия, Тюмень, Володарского, 6

Манипулирование микрочастицами и биологическими объектами, взвешенными в жидкой среде, или формирование самосборки желаемой структуры и морфологии на поверхностях имеют решающее значение в химических и биомедицинских исследованиях, изготовлении новых материалов и покрытий в электронике и оптике.

Тепловая Марангони конвекция является перспективным методом управления частицами [1, 2], поскольку при минимальном воздействии на коллоидную систему миниатюрными нагревателями позволяет улавливать частицы, расположенные на больших (до нескольких миллиметров) расстояниях. Однако эффективность и гибкость метода ограничена тем, что силы Марангони действуют только в одном направлении (от источника тепла) не позволяя осуществлять динамическое и обратимое управление процессами осаждения частиц аналогично фотохимическому эффекту Марангони [3].

В данной работе мы сообщаем о подходе к управлению ансамблями частиц в обратимом режиме, позволяющем собирать частицы в желаемой области или удалять их из области, создавать круговые или кольцевые структуры. Подход основан на управлении потоками Марангони путем изменения знака градиента поверхностного натяжения с использованием локального источника тепла, который обратимо переключается в режим теплоотвода, Рис. 1. Точечным нагревателем и стоком тепла служил медный стержень, вмонтированный в дно кюветы, соединенный с элементом Пельтье.

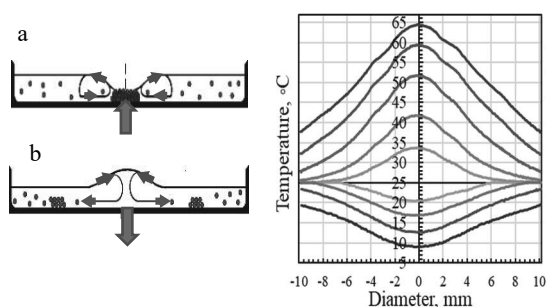


Рис.1. (а) ТК прогиб слое при нагреве. (б) ТК холмик при охлаждении. (с) Радиальные распределения температуры при нагреве и охлаждении сухой подложки.

В режиме нагрева в слое суспензии возникает термокапиллярная (ТК) конвекция, которая приводит к утончению слоя в зоне нагрева за счёт переноса нагретой жидкости на холодную периферию. При этом частицы увлекаются вихревым ТК движением

перемещаясь вдоль свободной поверхности от центра, а в придонном возвратном течении к зоне нагрева, Рис. 1(а, сверху). При смене полярности напряжения на Пельтье элементе происходит локальное охлаждение слоя. В результате возникает обратный ТК эффект – перенос жидкости к холодной зоне с формированием холмика. В этом случае частицы увлекаются ТК течением по поверхности к центру ячейки, а в придонном течении от центра, Рис. 1 (б, снизу). Для демонстрации обратимого режима процесса манипуляции микрочастицами использовали суспензию частиц полиэтилена в изопропанол. Размеры частиц варьируются от 50 до 150 мкм, толщина слоя около 400 мкм. Из-за высокой плотности частицы осаждались на дно ячейки и увлекались придонным течением.

На Рис. 2 показан процесс обратимого управления частицами: (1–3) охлаждение – частицы перемещаются от стока тепла к бортикам ячейки; (4–6) нагрев – частицы перемещаются к центру ячейки, формируя круговой паттерн; (7–9) повторное охлаждение – формирование кольцевой структуры.

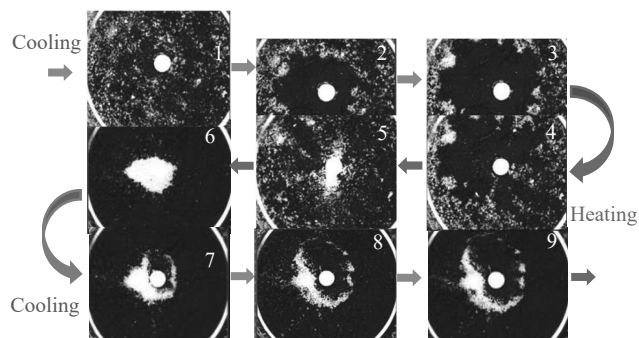


Рис.2. Обратимая манипуляция частицами охлаждение-нагрев-охлаждение. Формирование круговой и кольцевой структуры.

Список литературы:

1. Ivanova N.A., Starov V. M., Trybala A., Flyagin V.M. Removal of micrometer size particles from surfaces using laser-induced thermocapillary flow: Experimental results. J. Coll. Interface Sci., 473, 120–125 (2016).
2. Li Y., Lv C., Li Z., Quere D., Zheng Q. From coffee rings to coffee eyes. Soft matter, 11, 4669–4673 (2015).
3. Feldmann D., Maduar S.R., Santer M., Lomadze N., Vinogradova O. I., Santer S. Manipulation of small particles at solid liquid interface: light driven diffusioosmosis. Sci. Report, 6, 36443 (2016).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-02-00937)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗРУШЕНИЯ МАКРООБЪЕМА ЖИДКОСТИ

Антонникова А.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

Одним из распространенных способов тушения крупных пожаров, особенно в труднодоступных районах, является сброс хладагента (как правило, воды) в очаг пожара с борта самолета или вертолета с помощью специальных шлюзовых систем. Для повышения эффективности технологии авиационного пожаротушения необходимо моделирование процессов: разрушения макрообъема жидкости, сбрасываемого из водосливного устройства летательного аппарата, с образованием первичного облака полидисперсных капель [1], эволюции аэрозольного облака при его гравитационном осаждении [2] и взаимодействия облака капель с очагом пожара [3].

В настоящее время отсутствуют математические модели процесса распада больших объемов жидкости на облако первичных капель под действием сил тяжести, инерции, поверхностного натяжения и ветровой нагрузки.

В настоящем сообщении представлены результаты экспериментального исследования влияния поверхностного натяжения на динамику разрушения макрообъема жидкости.

Формирование макрообъема жидкости осуществлялось следующим образом (рис. 1). Тонкая оболочка из латексного материала наполнялась жидкостью, формируя сферическую частицу заданного объема 1. На вертикальной штанге 2, с возможностью перемещения (регулирования высоты), расположено устройство 3 обеспечивающее равномерный разрыв латексной оболочки и освобождение макрообъема жидкости перед последующим осаждением жидкокапельного аэрозольного облака 4.

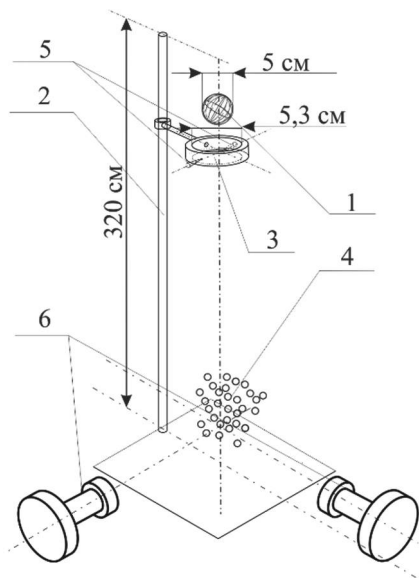


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Процесс гравитационного осаждения жидкокапельного аэрозольного облака фиксировался двумя перпендикулярно расположенными скоростными видеокамерами 6.

В качестве исследуемой жидкости использовалась дистиллированная вода. Для изменения поверхностного натяжения дистиллированной воды добавлялось поверхностно-активное вещество (ПАВ, додецилсульфат натрия). Изменение коэффициента поверхностного натяжения жидкости варьировалось в диапазоне $(35 \div 72)$ мН/м. Высота с которой производился сброс не превышала 3.2 м. Экспериментальные результаты по влиянию коэффициента поверхностного натяжения жидкости на расстояние, пройденное макрообъемом жидкости до начала его разрушения, приведены на рис. 2.

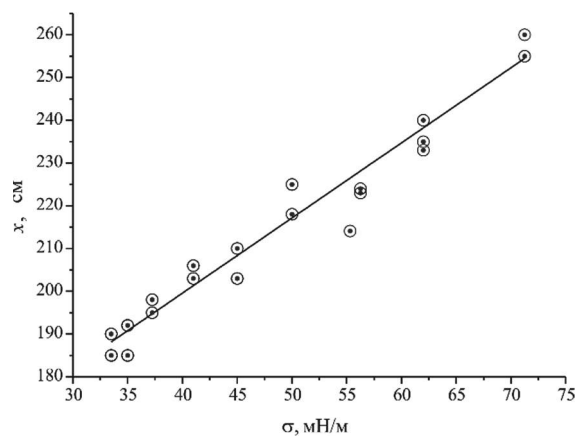


Рис. 2. Зависимость расстояния, пройденного макрообъемом жидкости до начала его разрушения, от коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

Таким образом, экспериментально показано, что коэффициент поверхностного натяжения жидкости существенно влияет на динамику разрушения макрообъема жидкости при его гравитационном осаждении. Введение ПАВ в состав жидкости снижает ее коэффициент поверхностного натяжения. При введении ПАВ в дистиллированную воду при уменьшении коэффициента поверхностного натяжения от 72 до 35 мН/м расстояние, на котором происходит разрушение макрообъема жидкости, сокращается от 255 до 185 см. Этот эффект необходимо учитывать при моделировании процесса сброса хладагента.

Список литературы:

1. Накоряков В.Е., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. О предельных поперечных размерах капельного облака при разрушении водяного массива в процессе падения с большой высоты // Доклады Академии наук. 2017. Т. 475. № 2. С. 145–149.
2. Ткаченко А.С., Маслов Е.А., Усанина А.С., Орлов С.Е. Программа расчета жидкокапельного аэрозольного облака. Программа для ЭВМ № 2016610567. Оpubл. 14.01.2016.
3. Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Испарение и трансформация капель и больших массивов жидкости при движении через высокотемпературные газы. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. – 302 с.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10014)

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЛИ ТОПЛИВНОЙ МИКРОЭМУЛЬСИИ С РАЗОГРЕТОЙ СТЕНКОЙ

Ашихмин А.Е.¹, Пискунов М.В.¹, Хомутов Н.А.¹, Яновский В.А.²

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

² Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

При сравнении с традиционным топливом использование топливных микроэмульсий способствует снижению уровня выбросов вредных веществ и увеличению эффективности горения, а также экономии углеводородного топлива. Интерес к водосодержащим дизельным топливам заключается в том, что при добавлении воды сажеобразование может быть минимизировано за счет микровзрывов, которые повышают эффективность формирования воздушно-топливной смеси и процесса горения в целом [1, 2]. Помимо этого, микроэмульсии на основе дизеля могут использоваться в дизельных двигателях и энергоустановках без существенного переоборудования системы подачи топлива в отличие от способа с прямым впрыском воды в камеру сгорания [3].

Во многих приложениях, например, в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) и при спрейнном охлаждении наблюдаются процессы взаимодействия распыленных потоков с разогретой стенкой. В случае ДВС [4] на жидком топливе чаще всего исследуется влияние температуры стенки на результат взаимодействия капель топлива [5] и эффект формирования вторичных капель жидкости (например, как в [6]). Учитывая развитие технологий эмульсионных и микроэмульсионных топлив [7, 8] следует обратить внимание на изучение взаимодействия капель таких топлив с разогретыми поверхностями.

Целью работы является исследование динамики взаимодействия капли термодинамически стабильной в широком диапазоне температур среды микроэмульсии на основе дизеля с разогретой стенкой.

При анализе результатов взаимодействия капель микроэмульсий с поверхностью используются числа Рейнольдса (Re), Вебера (We), Онезорге (Oh) и капиллярности (Ca):

$$\text{Re} = D_0 U_0 \nu^{-1}, \quad \text{We} = \rho D_0 U_0^2 \sigma^{-1}, \quad \text{Oh} = \frac{\sqrt{\text{We}}}{\text{Re}},$$

$$\text{Ca} = \frac{\mu U_0}{\sigma},$$

где D_0 – диаметр капли перед взаимодействием с подложкой, мм, U_0 – скорость капли перед взаимодействием с подложкой, м/с, ν – кинематическая вязкость, м²/с, ρ – плотность, кг/м³, σ – поверхностное натяжение, Н/м, μ – динамическая вязкость, Па·с.

Для приготовления топливных микроэмульсий использовались следующие компоненты: дизельное топливо; метиловые эфиры жирных кислот рапсового масла; дистиллированная вода; ПАВ – Неонол АФ 9–6; со-ПАВ – 2-этилгексанол.

Материал подложки – сплав AlMg6. Поверхность подложки зеркально полирована для достижения шероховатости $R_a=0,05-0,12$ мкм.

Для проведения экспериментов используется типичный стенд [9]. Основные элементы стенда: систе-

ма нагрева с регулируемой температурой, металлическая подложка, установка для генерирования капель, система освещения со светорассеивающей пластиной, ПК и высокоскоростная видеокамера.

Установлено, что взаимодействие капель топливных микроэмульсий может происходить в трех режимах: осаждение, термическое разрушение и отскок. Оценены количественные характеристики (средний диаметр вторичных капель, их количество и увеличение площади поверхности жидкости по отношению к начальной площади взаимодействующей капли) термического разрушения капель топливных микроэмульсий. Выполнено сравнение режимов взаимодействия капель микроэмульсий, дизеля и дистиллированной воды при варьировании температуры поверхности нагрева T_0 . Проведены эксперименты при постоянной температуре T_0 и при варьировании D_0 и U_0 , чтобы определить условия взаимодействия, характеризующие режим термического измельчения капель топливных микроэмульсий. Построены соответствующие карты режимов с использованием безразмерных чисел. Приведены аппроксимационные функции, определяющие переход между режимами термического разрушения и отскока.

Список литературы:

1. Fu W.B., Hou L.Y., Wang L., Ma F.H. A Unified Model for the Micro-Explosion of Emulsified Droplets of Oil and Water// Fuel Process. Technol. 2002. V. 79. No. 2. P. 107–119.
2. Ochoterena R., Lif A., Nydén M., Andersson S., Denbratt I. Optical Studies of Spray Development and Combustion of Water-in-Diesel Emulsion and Microemulsion Fuels// Fuel. 2010. V. 89. No. 1. P. 122–132.
3. Brusca S., Lanzafame R. Evaluation of the Effects of Water Injection in a Single Cylinder CFR Cetane Engine. SAE Technical Paper. SAE International, 2001.
4. Naber J.D., Reitz R.D. Modeling Engine Spray/Wall Impingement. SAE Technical Paper. SAE International, 1988.
5. Sen S., Vaikuntanathan V., Sivakumar D. Experimental Investigation of Biofuel Drop Impact on Stainless Steel Surface// Exp. Therm. Fluid Sci. 2014. V. 54, P. 38–46.
6. Cossali G.E., Marengo M., Santini M. Secondary Atomisation Produced by Single Drop Vertical Impacts onto Heated Surfaces// Exp. Therm. Fluid Sci. 2005. V. 29. No. 8. P. 937–946.
7. Kayali I., Karaeen M., Ahmed W., Qamhi K., Olsson U. Alternative Diesel Fuel: Microemulsion Phase Behavior and Combustion Properties// J. Dispers. Sci. Technol. 2016. V. 37. No. 6. P. 894–899.
8. Acharya B., Dash S. Tuning Commercial Diesel to Microemulsified and Blended Form: Phase Behavior and Implications// J. Dispers. Sci. Technol. 2018. V. 0. No. 0. P. 1–10. <https://doi.org/10.1080/01932691.2018.1500479>.
9. Roisman I.V., Breitenbach J., Tropea C. Thermal Atomisation of a Liquid Drop after Impact onto a Hot Substrate// J. Fluid Mech. 2018. V. 842. P. 87–101.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда (проект № 18-73-00083)*

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛИВА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ С ОДНОВРЕМЕННЫМ ЗАПОЛНЕНИЕМ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ЁМКОСТИ

Борзенко Е.И., Хегай Е.И., Шрагер Г.Р.

Томский государственный университет
e-mail: efim_h@ftf.tsu.ru

Широко распространенным процессом в технологии переработки полимерных материалов, применяющимся при производстве различных изделий, является процесс смешения с последующим сливом полимерной композиции в ёмкость [1, 2]. Характерной особенностью течения, реализуемого в процессе слива и заполнения, является наличие свободных поверхностей в сливной и заполняемой ёмкостях.

В работе проведено исследование гидродинамического процесса, реализуемого при сливе вязкой жидкости из конусообразной ёмкости с одновременным заполнением плоской прямоугольной ёмкости в плоском приближении (рис. 1).

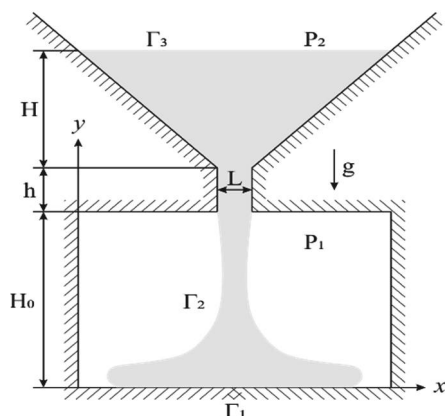


Рис. 1. Область решения.

Течение описывается уравнениями Навье-Стокса и неразрывности, которые в безразмерных переменных в декартовой системе координат записываются в виде

$$\begin{aligned} \text{Ga} \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \\ \text{Ga} \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + 1, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0. \end{aligned}$$

Здесь u, v – проекции вектора скорости на оси декартовой системы координат x, y , t – время, p – давление. В качестве масштабов длины, скорости, времени и давления используются следующие величины: L – ширина сливного насадка, комплексы $\rho g L^2 / \mu$, $\mu / \rho g L$ и $\rho g L$ соответственно. В постановку входят безразмерные параметры: число Галилея Ga ; избыточное давление на свободной поверхности в сливной ёмкости P и геометрические характеристики. Число Галилея и избыточное давление определяются формулами

$$\text{Ga} = \frac{g \rho^2 L^3}{\mu^2}, \quad P = \frac{P_2 - P_1}{\rho g L},$$

где μ – вязкость жидкости, ρ – плотность, g – ускорение силы тяжести.

На твердых стенках Γ_1 выполняются условия прилипания. На свободных поверхностях Γ_2 и Γ_3 выполняются условия непрерывности нормальных и касательных напряжений.

В начальный момент времени жидкость расположена в сливной ёмкости, при этом свободные границы Γ_2 и Γ_3 являются прямыми $y=H_0$ и $y=(H_0 + h + H)$ соответственно.

В момент достижения свободной поверхностью Γ_3 плоскости сливного отверстия $y=(H_0 + h)$ сливная ёмкость вновь считается заполненной жидкостью до уровня $y=(H_0 + h + H)$. Таким образом реализуется непрерывный процесс слива до полного заполнения нижней ёмкости без прорыва газа из сливной ёмкости.

Сформулированная задача решается численно VOF-методом [1]. Во внутренних узлах сетки для расчета составляющих вектора скорости используется метод контрольного объема, при этом давление рассчитывается с помощью процедуры SIMPLE [2]. Движение свободной поверхности реализуется по вычислительной технологии PLIC-VOF-метода [3], который является модификацией оригинального метода VOF.

Проведены параметрические исследования рассматриваемого процесса. Продемонстрировано влияние безразмерных критериев задачи на эволюцию свободных поверхностей в сливной и заполняемой ёмкостях. Выявлены различные режимы формирования свободных поверхностей как для процесса слива, так и для процесса заполнения в зависимости от значений определяющих параметров. Получены распределения кинематических характеристик потока.

Список литературы:

- Ищенко В.П., Шрагер Г.Р., Якутенок В.А. Теоретическое и экспериментальное исследование воронкообразования при истечении жидкости из осесимметричных ёмкостей // Механика жидкости и газа. 1988. №4. С. 20–25.
- А.В. Новошинцев, Г.Р. Шрагер, В.А. Якутенок Истечение вязкой жидкости из ёмкостей с учетом формирования струи // Механика жидкости и газа. 2008. №6. С. 15–24.
- Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries // Journal of Computational Physics. 1981. No. 39. P. 201–225.
- Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и механики жидкости. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
- Jang W., Jilesen J., Lien F.S., Ji H. A study on the extension of a VOF/PLIC based method to a curvilinear co-ordinate system // International Journal of Computational Fluid Dynamics. 2008. V.22, No. 4. – P. 241–257.

Работа выполнена при финансовой поддержке
РФФИ (проект № 18-08-00412)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Булатова А.З., Абрамова О.А., Питюк Ю.А., Фаткуллина Н.Б.

Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем, Башкирский государственный университет
450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32А

Дисперсные включения различных типов занимают существенное место в живой природе, технике, повседневной жизни. Постоянный интерес к таким системам проявляют исследователи из таких областей, как физика и механика, коллоидная химия и биология, что обусловлено многообразием явлений и эффектов, связанных с дисперсными системами различной природы. Как известно, многофазные течения очень сложны по своей структуре и во многом зависят от течений на микроуровне (в масштабе одиночных включений), определяющих обмен массой, импульсом и энергией между фазами и зависящими от формы частиц, взаимодействия частиц с границами области и между собой, присутствия примесей и т.д. Математическое моделирование таких явлений является сложной и актуальной задачей, необходимых для решения ряда прикладных задач, возникающих в нефтяной и газовой промышленности, при производстве микроустройств, разработке экологических, медицинских, био- и микро-, и многих других технологий.

В настоящей работе исследуется трехмерная динамика недеформируемых частиц различных форм и пузырьков под действием сдвигового потока в неограниченном объеме вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса и умеренных числах Струхала. В таком случае вязкие силы значительно превосходят сил инерции, поэтому такое течение описывается уравнением Стокса с соответствующими граничными и кинематическими условиями. Все процессы рассматриваются при изотермических условиях, без учета сил Ван-дер-Ваальса.

Для решения поставленных трехмерных задач применены высокоэффективные вычислительные подходы, реализованные авторами ранее и успешно применяемые для исследования дисперсных систем [1–3]. Численный метод основывается на методе граничных элементов [4], который очень эффективен при изучении трехмерных задач в неограниченных областях, так как все расчеты связаны только с границей рассматриваемых включений, поэтому нет необходимости покрывать равномерной сеткой всю трехмерную область. В зависимости от масштаба исследуемой задачи, программная реализация предусматривает выбор оптимальных алгоритмов. Для ускорения расчетов при увеличении масштаба задач в обобщенном методе минимальных невязок GMRES [5] используется модуль матрично-векторного произведения без хранения матрицы в памяти вычислительной системы, распараллеленный на GPU с использованием технологии CUDA. Более подробно численная реализация описана в [1, 3].

В рамках исследования были проведены численные эксперименты по моделированию трехмерной динамики недеформируемых частиц несферической

формы, например капсул различной длины в сдвиговом потоке (см. рис. 1).

Кроме того, программные модули были использованы для расчета вклада дисперсных включений в реологические характеристики всей системы в целом, а также для изучения влияния деформации пузырьков на компоненты тензора напряжений.

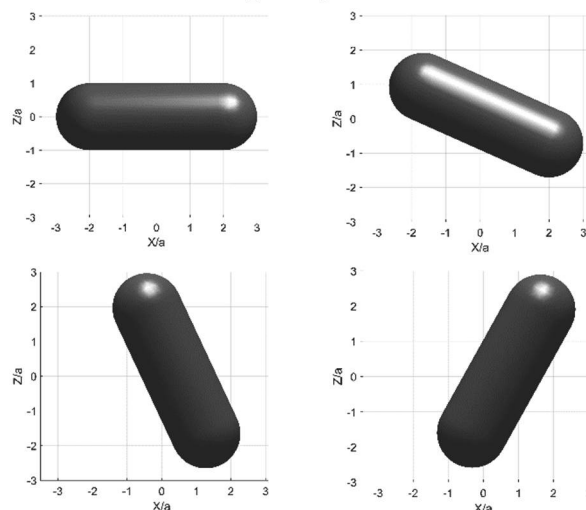


Рис. 1. Динамика недеформируемой частицы в сдвиговом потоке в различные моменты времени (слева направо).

Реализованный подход может быть использован для изучения особенностей динамики дисперсных включений в объеме вязкой жидкости, а также для определения реологических параметров дисперсных включений, состоящих из микропузырьков, а также из частиц различных несферических форм. Он позволяет изучать изменения во времени различных реологических характеристик и их зависимости от ряда физических параметров.

Список литературы:

1. Abramova, O.A., Akhatov, I.S., Gumerov, N.A., Pityuk, Y.A., Sametov, S.P. Numerical and Experimental Study of Bubble Dynamics in Contact with a Solid Surface // *Fluid Dynamics*. – 2018. – V. 53(3), P. 337–346.
2. Zarafutdinov, I.A., Pityuk, Y.A., Gainetdinov, A.R., Gumerov, N.A., Abramova, O.A., Akhatov, I.S. GPU acceleration of bubble-particle dynamics simulation // *Communications in Computer and Information Science*. – 2018. – V. 910, P. 235–250.
3. Abramova, O.A., Pityuk, Yu.A., Gumerov, N.A., Akhatov, I.Sh. High performance BEM simulation of 3D emulsion flow // *Communications in Computer and Information Science (CCIS)*. – 2017. – Vol. 753. P. 317–330.
4. Pozrikidis C. *Boundary Integral and Singularity Methods for Linearized Viscous Flow*. – 1992 (Cambridge University Press, Cambridge, MA).
5. Saad Y. *Iterative Methods for Sparse Linear System*. – 2000, SIAM.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 18-71-00068

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА
В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЕ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА****Булгакова Г.Т., Шарифуллин А.Р.**Уфимский государственный авиационный технический университет,
450008, Россия, Уфа, Карла Маркса, 12

В настоящее время в связи с необходимостью интенсификации добычи нефти активно применяется технология гидравлического разрыва пласта (ГРП). При этом важной задачей является контроль качества проведения операции с целью совершенствования технологии, корректировки дизайна ГРП и определения параметров полученной трещины.

Температура закачиваемых технологических жидкостей при ГРП обычно ниже, чем пластовая температура. Закачка холодных жидкостей при гидравлическом разрыве пласта в высокотемпературные пласты приводит к охлаждению пласта вокруг трещины и ствола скважины. Утечка жидкости из трещины вызывает неравномерное распределение температуры вокруг разрушенной зоны.

При составлении дизайна ГРП необходимо прогнозирование изменения температуры на конце трещины ГРП фиксированной геометрии в процессе закачки жидкости в скважину. Это особенно важно для высокотемпературных пластов. Профиль температуры в трещине ГРП необходим для оптимального проектирования состава жидкости разрушения. В состав технологической жидкости обязательно входят сшивающий агент (сшиватель) и разрушающий агент брейкер, концентрация которых рассчитывается по величине температуры на конце трещины. В настоящее время концентрация сшивателя и брейкера рассчитывается по максимальной температуре пласта, что может привести к снижению эффективности ГРП, так как брейкер не полностью разрушит сшитый гель. Это в свою очередь при опробовании скважины после стимуляции может привести к выносу проппанта, сведя эффективность стимуляции к нулю. В связи с этим, оптимизация процесса принятия решений при проектировании гидроразрыва пласта в терригенных коллекторах путем расчёта оптимальных параметров технологических жидкостей на основе прогнозирования процессов теплообмена, происходящих в процессе обработки, является весьма актуальной задачей. Разработанные математические модели могут быть использованы в симуляторах ГРП. Цель работы состоит в разработке инструмента для повышения эффективности проектирования дизайна гидроразрыва пласта на основе математического моделирования температурных полей в трещине ГРП при её развитии и опробовании.

В задаче расчета профиля температуры в трещине ГРП при закачке проппанта приняты допущения: рассматривается одиночная вертикальная скважина с вертикальной трещиной ГРП. Тепловой поток в направлении вертикальной плоскости пренебрегается. Рассматривается конвективный перенос тепловой энергии вдоль трещины по оси X и кондуктивный теплообмен на боковой поверхности трещины вдоль оси Y, ось X считается параллельной направлению распространения трещины и проходит через центр

трещины. Ось Y параллельна направлению утечки жидкости из трещины в пласт. Трещина ГРП имеет равномерную ширину (прямоугольное сечение). Высота трещины равна толщине проницаемой однородной зоны. Поток жидкости разрыва пласта в трещине линейный, а направление теплового потока перпендикулярно боковой поверхности трещины. Жидкость в трещине считается несжимаемой. Перемещение жидкости разрыва в трещине рассматривается в рамках поршневой модели. Давление в трещине постоянно и равно давлению закачки жидкости разрыва. Траектории движения жидкости из трещины в пласт являются прямыми линиями на рассматриваемом участке пласта. Жидкость гидроразрыва является ньютоновской жидкостью. Скелет породы в пласте является упруго деформируемым. Жидкость в пласте является слабосжимаемой. Для расчета утечек жидкости в пласт используется формула Картера [1].

После прекращения закачки проппанта, скважина выдерживается определенное время, в течение которого в пласте и трещине восстанавливаются давление и температура при извлечении технологической жидкости из трещины. Скорость конвективного переноса при извлечении жидкости $v(t)$ рассчитывается по фактическим данным изменения забойного давления от времени $v(t)$. Рассматривая баланс энергии для элементарного объема трещины, получаем дифференциальное уравнение для расчета температуры вдоль трещины ГРП, учитывая, что направление потока жидкости и положительное направление оси OX противоположны

За начальное распределение температуры в трещине принимается температура $T(x)$ на конец закачки проппанта. На скважине задается условие тепловой изоляции. Для проверки адекватности предложенных моделей рассматривалась задача извлечения технологической жидкости из трещины ГРП. Математическая модель распределения температуры в трещине гидроразрыва при закачке проппанта позволяет получить решение обратной задачи восстановления температуры на забое скважины после прекращения закачки жидкости разрыва, т.е. в период освоения скважины. Решение обратной задачи методом квазирешений В.К. Иванова [2] позволяет уточнить данные по коэффициенту теплообмена в процессе развития трещины и коэффициент утечки жидкости.

Список литературы:

1. Есипов Д.В., Куранков Д.С., Лапин В.Н., Чёрный С.Г. Математические модели гидроразрыва пласта // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19. №2. С. 33–61.
2. Иванов В.К., Васин В.В., Танана В.П. Теория линейных некорректных задач и ее приложения. М.: Наука, 1978. 206 с.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ
№ 17-41-020226 p_a*

ВЛИЯНИЕ АКТИВНОГО И ПАССИВНОГО ЗАВИХРИТЕЛЕЙ НА ВСПИКАНИЕ СТРУЙ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ

Бусов К.А., Решетников А.В., Мажейко Н.А., Капитунов О.А.

Институт теплофизики УрО РАН,
630090, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

Актуальность исследований процессов истечения перегретых жидкостей обусловлена их интенсивным использованием в технике и технологиях. При высоких начальных параметрах жидкости (температура, давление), близких к критическим термодинамическим, в потоке проявляется процесс интенсивного рождения и развития паровых зародышей – взрывное вскипание [1]. Сосредоточенность и высокая интенсивность вскипания могут приводить к существенным отклонениям в поведении интегральных характеристик струи, в частности к изменению ее формы. В связи с этим важной задачей является поиск эффективных средств, оказывающих влияние на параметры потока. Одним из способов воздействия на характеристики вскипающей струи является использование вихревого эффекта [2, 3].

В данной работе проведено комплексное экспериментальное исследование влияния закрутки потока на форму струи вскипающей жидкости. Закрутка жидкости осуществлялась двухлопастным завихрителем, приводимым в действие электродвигателем или пассивными завихрителями (скрученная лента и проволока навивка). В качестве рабочей жидкости использовалась вода. Истечение происходило из камеры высокого давления через короткий цилиндрический канал в атмосферу. Исследования проводились в широком интервале температур от 100 до 290°C при изменении давления от атмосферного до 7.5 МПа.

При использовании двухлопастного завихрителя, изменение формы вскипающей струи значительно зависело от скорости его вращения. Так, при невысоких скоростях $\omega < 500$ об/мин закрученная струя не отличалась от незакрученной во всем исследованном температурном интервале. Заметное влияние закрутки потока на его форму было обнаружено при скорости вращения $\omega = 900$ об/мин при реализации в струе механизма взрывного вскипания. В этом случае закрученная струя приобретала более компактный вид относительно незакрученной струи и текла как в осевом, так и в радиальном направлении. При высоких скоростях вращения завихрителя $\omega > 1800$ об/мин наблюдалось истечение перегретой струи с небольшим углом раскрытия. Полного развала струи, характерного для незакрученной струи при интенсивном вскипании, обнаружено не было. Величина угла раскрытия изменялась в интервале от 10° до 60° для $\omega = 1800$ об/мин, а для $\omega = 3000$ об/мин – от 10° до 30°.

При использовании пассивных завихрителей наблюдалось истечение перегретой струи, принципиально отличающейся по своему виду и структуре. Так, например, при малых перегревах не наблюдалось сплошного жидкостного ядра, как в случае отсутствия завихрителя. Поток полностью был раздроблен на капли разного размера. Данный вид струи наблюдался до температуры $T = 170^\circ\text{C}$. С увеличением температуры начинал расти угол раскрытия струи, вследствие воз-

растания интенсивности вскипания. Поток состоял из равномерно распределенных мелких капель. При температуре $T = 180^\circ\text{C}$ наблюдалось совпадение углов раскрытия, как у струи, истекающей с пассивными завихрителями, так и без них. Монотонное возрастание угла раскрытия происходит до температуры $T = 210^\circ\text{C}$. При данной температуре проявляется сосредоточенное и интенсивное (взрывное) объемное вскипание, которое в сочетании с эффектом Коанда позволяет наблюдать полное раскрытие струи. Однако, при использовании пассивных завихрителей полный развал струи не был устойчивым, как в случае истечения перегретой воды без завихрителя. Для температур выше $T > 210^\circ\text{C}$ наблюдалась потеря устойчивости у вскипающей струи – большие флуктуации угла раскрытия струи. Поток за короткие промежутки времени то схлопывался, то полностью раскрывался. Полный развал струи мог принимать, как дискообразную форму, характерную для развала незакрученной струи, так и вид полосы шириной около 250 мм. При температурах $T > 270^\circ\text{C}$ струя перегретой воды принимала устойчивую коническую форму, подобную газовой, вид которой не изменялся и не зависел от типа пассивных завихрителей.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования вскипания струи перегретой воды, истекающей через короткий цилиндрический канал с завихрителями различных типов, показали на возможность эффективного воздействия на форму потока. Использование активного завихрителя позволило при умеренных скоростях вращения $\omega = 900$ об/мин наблюдать более компактное течение в радиальном направлении, а также присутствие парового облака в осевом направлении. С увеличением скоростей вращения завихрителя происходило уменьшение в изменении амплитуды угла раскрытия струи и подавление влияния процессов вскипания. Использование пассивных завихрителей привело к прецессии раздробленной жидкой сердцевины при малых перегревах и к видоизменению формы полного развала (течение в виде полосы) струи с потерей ее устойчивости в условиях взрывного вскипания.

Список литературы:

1. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. – М.: Наука 1972. 312 с.
2. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки // Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 588 с.
3. Алексеенко С. В., Окулов В. Л. Закрученные потоки в технических приложениях (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т. 3. № 2. С. 101–138.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ, гранты №№ 18-08-00742, 18-38-00404 мол_а, 19-08-00091 и Комплексной программы УрО РАН проект № 18-2-2-3.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ НА ОБМЕН ИМПУЛЬСОМ И ТЕПЛОМ В ПОГРАНИЧНОМ АТМОСФЕРНОМ СЛОЕ ПРИ СИЛЬНЫХ ВЕТРАХ

Вдовин М.И., Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А.

Институт прикладной физики РАН,
603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 49

Основными количественными характеристиками атмосферного и океанического турбулентного обмена являются потоки импульса и тепла. Эти потоки играют важную роль во многих метеорологических и океанографических исследованиях, моделировании климата, прогнозирования погоды, моделировании процессов пограничного слоя атмосферы и т.д.

Проблема зависимости коэффициентов обмена импульсом и теплом в морском атмосферном пограничном слое в зависимости от скорости ветра тесно связана с вопросом о влиянии поверхностных волн. Многие исследования показывают, что перенос импульса за счет поверхностного волнения увеличивается с ростом скорости ветра. Уменьшение потока турбулентного импульса вблизи поверхности воды приводит к уменьшению скорости ветра на стандартной высоте, росту коэффициента сопротивления и параметра шероховатости поверхности. Влияние волновых возмущений на поток тепла слабее, чем на поток импульса, потому что даже при умеренных скоростях ветра тепловой поток, управляемый возмущениями вызванными волнами, составляет долю процента от турбулентного теплового потока.

Целью данного исследования является изучение влияния скорости ветра и возмущений водной поверхности на обмен импульсом и теплом в морском атмосферном пограничном слое. Основное отличие этого исследования от предыдущих экспериментальных исследований и натурных наблюдений заключается в использовании искусственного, независимого от скорости ветра управления параметрами волнения при заданной скорости ветра. Это позволило получить зависимости коэффициентов переноса от скорости ветра и характеристик поверхностного волнения. Следует отметить, что коэффициент переноса потока и коэффициент теплопередачи измерялись одновременно.

Исследования проводились на базе высокоскоростного ветро-волнового канала ИПФ РАН. Подробное описание экспериментальной установки, принципы создания и управления воздушным потоком приведены в [1]. Эквивалентные скорости ветра в эксперименте для стандартной метеорологической высоты 10 м составили от 10 до 35 м/с. Температурная стратификация между водой и воздухом в канале составляла 20 градусов.

Профили скорости и температуры в рабочей секции канала (на расстоянии 6,5 м от начала) измерялись одновременно с помощью L-образной трубки Пито и пленочного термоанемометра, которые были установлены на сканирующее устройство. Использовался метод вертикального сканирования с шагом 3-5 мм по высоте и временем накопления 2 минуты в каждой точке. Для каждого фиксированного параметра ветра были измерены два профиля скорости и температуры для последующего усреднения.

Особенностью данного эксперимента является возможность управления поверхностными волнами независимо от скорости ветрового потока в канале. Для этого внутри канала была вытянута пластиковая сетка толщиной 0,25 мм с ячейкой 1,6 x 1,6 мм. Сетка не влияла на теплообмен, но позволяла изменять характеристики поверхностных волн в зависимости от заглубления: волны отсутствовали, когда сетка находилась непосредственно вблизи уровня невозмущенной поверхности воды, но на максимальной глубине (33 см) она практически не влияла на параметры волнения для всех скоростей ветра в эксперименте.

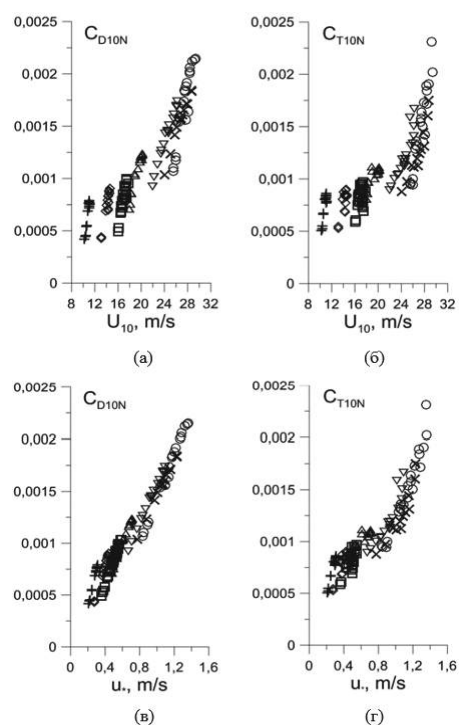


Рис. 1. Коэффициенты сопротивления и переноса тепла от скорости на высоте 10 м U_{10} и от скорости трения u_* .

Показано, что коэффициенты обмена увеличиваются с увеличением скорости ветра и высоты волнения. При этом выделяется резкое увеличение коэффициентов сопротивления и теплообмена при высоких скоростях ветра (превышающих 20 м/с), когда начинается обрушения волн и появляется большое количество брызг в воздушном потоке над водой.

Список литературы:

1. Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions / Troitskaya Yu.I., Sergeev D.A., Kandaurov A.A., Baidakov G.A., Vdovin M.A., Kazakov V.I.; Journal of Geophysical Research. V. 117. 2012.

Проведение экспериментов поддержано проектами
РФФИ 18-05-00265, 18-05-60299, 18-55-50005.
Обработка данных осуществлена за счет гранта
РНФ 19-17-00209.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ ПЕРЕГРЕТЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КАПЕЛЬ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ, ВОДЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ ИНДУКТОРА**Виноградов Д.А., Ивочкин Ю.П., Кубриков К.Г., Тепляков И.О.**Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2

Поведение горячих жидкометаллических капель как лежащих на поверхности, так и левитирующих в электромагнитном поле представляет интерес для исследователей, занимающихся изучением теплофизических свойств различных металлов и сплавов при высоких температурах, а также позволяют относительно просто изучить механизмы протекания многих интересных физических процессов, обладающих практической значимостью. В частности, с помощью информации, полученной при изучении механизмов тонкой фрагментации расплавленного металла, падающего в холодную воду, можно получить важную информацию по протеканию парового взрыва. Представленный доклад содержит новые данные об особенностях поведения перегретых металлических шаров и жидкометаллических капель в различных средах и разных условиях нагрева.

Экспериментальная установка и методика исследований. Опыты были проведены на специально созданной установке с индукционным нагревом. Твердотельные образцы, изготовленные из различных металлов (олово, цинк, медь, сталь, сплав никеля с лантаном NiLa5), размещались в газовой среде (воздух, аргон) и нагревались в левитационном или полулевитационном (образец лежит на неэлектропроводящей высокотемпературной подложке) режимах индуктором. Затем в расплавленном состоянии, образцы (капли) падали в кювету, заполненную дистиллированной водой комнатной температуры. В экспериментах контролировалась температура плавящегося образца и велась видеозапись его поведения в процессах индукционного нагрева и дробления.

Блок питания индуктора включал в себя инвертор, конструкция которого была усовершенствована с помощью дополнительных устройств фазовой автоподстройки системы и скоростной защиты силовых транзисторов от превышения тока. Специальный импульсный регулятор позволяет управлять мощностью инвертора с помощью персонального компьютера. Подобные доработки позволили обеспечить устойчивую работу индуктора на частоте тока 250 кГц и провести исследования процесса плавки различных металлических (олово, цинк, алюминий, никель, нержавеющая сталь) образцов, нагретых в лабораторных условиях до температур выше 1600 °С.

Результаты экспериментов, проведенных на воздухе. Подтверждено, что при нагреве стальной капли на воздухе наблюдается интенсивное искрообразование (капельная эрозия) металла, которое препятствует возникновению режима пленочного кипения охладителя и способствует предотвращению взрывной фрагментации расплава. Посредством компьютерной обработки видеоматериала получены осциллограммы потерь жидкого металла при его интенсивном нагреве и проведена оценка скорости протекания этого процесса (капельной эрозии металла).

Результаты экспериментов, проведенных при нагреве в аргоне, свидетельствуют об отсутствии режима интенсивной капельной эрозии. В этих условиях наблюдается деформация (вытягивания) капли и ее интенсивные объемные колебания в высокочастотном электромагнитном поле. С помощью скоростной видеосъемки определены характерные частоты и формы этих колебаний. В режиме остывания стальной капли в аргоне при выключенном индукторе наблюдается другой необычный физический эффект, связанный с выбросом струй (или отдельных капель) жидкости с ее поверхности в окружающее пространство. Имеет место следующая временная последовательность протекания этого процесса. Сразу после выключения электрического тока в индукционном нагревателе стальной жидкий образец принимает форму сферической капли и «консервируется» в этом положении одну – две секунды. Затем, по мере остывания образца на поверхности капли и, очевидно в ее объеме, возникает течение расплава, которое деформирует форму капли и генерирует колебания поверхности, что сопровождается выбросом струй жидкости. Физическая природа этого явления не совсем ясна и требует дополнительного изучения. Можно лишь предположить, что наблюдаемый эффект, вероятно, связан с газами, растворенными в расплаве и выделяемыми при его остывании; известно, что растворенность газов в жидких металлах уменьшается при снижении их температуры.

Эксперименты в воде, имеющей температуру ниже температуры кипения (недогрев 80 °С), были проведены как с использованием раскаленных до 1400 °С металлических шариков (тип стали ШХ15, 95Х18, диаметр 5–10 мм), так и с помощью жидкометаллических капель. Получена картина изменения формы межфазной поверхности пар – жидкость в зависимости от температуры нагретого тела. Установлено, что режим пленочного кипения с отрывом паровых пузырей, наблюдается при температурах выше 350 °С. Температура нагретой поверхности определяющим образом влияет на частоту отрыва пузырей (с ростом температуры частота отрыва увеличивается), но практически не оказывает влияние на толщину паровой оболочки и отрывной диаметр паровых образований $d \approx 3.3$ мм. С ростом гидростатического давления (от 20 до 180 мм вод. ст.) частота отрыва уменьшается на порядок.

Приведены результаты исследования фрагментации жидкометаллических капель, выполненного с помощью высокоскоростной (до 10000 кадр/с) видеосъемки процесса.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
РФФИ (проект № 18-08-00955)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОТОКА ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКИ РАСПЫЛЕННОГО ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Губин В.Е.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Ежегодный рост цен на топливно-энергетические ресурсы является причиной создания и развития новых топливных технологий для энергетики и промышленности [1–2]. Альтернативные и возобновляемые источники энергии частично позволяют компенсировать потребность в дешевой и доступной энергии [3]. Мировые запасы энергетических углей являются предпосылками к созданию новых экологически перспективных и энергоэффективных топлив [4]. Исследования [5–7] позволяют сделать вывод, что наиболее перспективным видом топлива для энергетики является водоугольное топливо (ВУТ).

Целью работы являются экспериментальные исследования структуры потока ВУТ в процессе его пневмомеханического распыла и классифицирование этапов дробления капель ВУТ.

Постановка эксперимента

Экспериментальная установка для исследования процессов дробления капель ВУТ в потоке представлена на рис. 1. Для распыла ВУТ используется пневмомеханическая форсунка 1, расположенная в аэродинамическом имитаторе топки 2. ВУТ подается с помощью мембранного насоса с пневмоприводом серии NDP15 3 из бака запаса ВУТ 4. Распыляющий агент (воздух) нагнетается компрессором 5. Распыленный поток подсвечивается лазерным ножом. Регистрация распыла осуществляется высокоскоростной кросскорреляционной камерой 7. Для регистрации различных участков факела камера устанавливается в нескольких положениях (А, В, С).

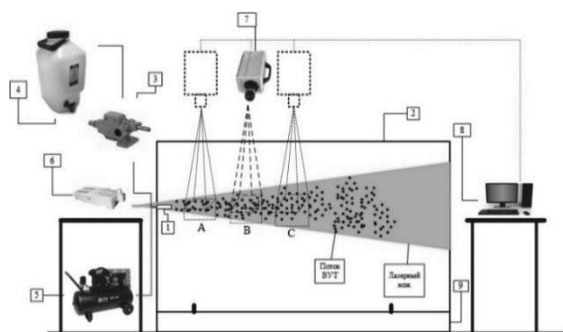


Рис. 1. Принципиальная модель экспериментальной установки.

Результаты и их обсуждение

При определении диаметра капель ВУТ в процессе пневмомеханического распыла выделено несколько характерных диапазонов с соответствующими значениями скоростей. Установлено, что диапазонам скоростей капель 25–29 м/с и 30–35 м/с соответствуют размеры капель диаметром от 500 до 300 мкм и от 300 до 50 мкм. На рис. 2 представлены зависимости, характеризующие изменения чисел We от скорости капель ВУТ различных диаметров на исследуемых отрезках А, В, С.

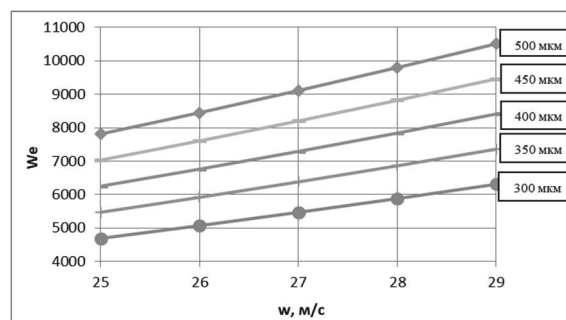


Рис. 2. Зависимость числа We от скорости капель.

На рис. 3 представлена фотография потока ВУТ.

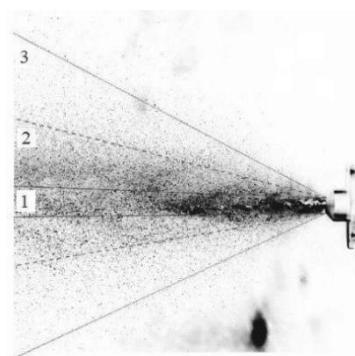


Рис. 3. Факел распыляемого ВУТ: 1 – сердцевина потока; 2 – средняя зона; 3 – внешняя зона.

Высокоскоростная визуализация потока позволяет выделить характерные зоны потока, распыляемого ВУТ: ярко выражена сердцевина потока, средняя и внешняя зоны.

Список литературы:

1. Franco, A. The future challenges for “clean coal technologies”: Joining efficiency increase and pollutant emission control // Dipartimento d’Energetica “L. Poggi”, Università di Pisa. 2009. Vol. 34. Iss. 3. P. 348–354. DOI: 10.1016/j.energy.2008.09.012
2. Долгушин, И.А. Исследование и совершенствование схемы ТЭС с котлом ЦКС для повышения эффективности и улучшения экологических показателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / И.А. Долгушин. М., 2014. 166 с.
3. C.G. Meza, C. Zuluaga Rodríguez et al. Toward a 100% renewable island: A case study of Ometepe's energy mix // Renewable Energy. 2019. Vol. 132. P. 628–648 DOI: 10.1016/j.renene.2018.07.124
4. Мариничева, О. Уголь возвращается в генерацию // Энергетика и промышленность России. 2012. № 11.
5. Khodakov, G.S. Coal-water Suspensions in Power Engineering // Thermal Engineering. 2007. Vol. 54 (1). P. 36–47. DOI: 10.1134/S0040601507010077
6. Саламатин, А.Г. О состоянии и перспективах использования водоугольного топлива в России // Уголь. 2000. № 3. С. 10–15.
7. Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Лазарев С.И., Лапин Д.А. Сжигание каменного угля в виде водоугольной суспензии в котлах малой мощности // Теплоэнергетика. 2014. № 7. С. 25–29. DOI: 10.1134/S0040363614070066.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ДЕКОМПРЕССИИ НА СИНТЕЗ ГАЗОВОГО ГИДРАТА МЕТОДОМ ВЗРЫВНОГО ВСКИПАНИЯ СЖИЖЕННОГО ГИДРАТООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗА

Глезер В.В.^{1,2}, Мелешкин А.В.¹, Барташевич М.В.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

В работе представлено экспериментальное исследование влияния расхода газа при сбросе давления на синтез гидрата газа методом взрывного вскипания сжиженного гидратообразующего газа в объеме воды при декомпрессии при температуре перед сбросом давления 2°C. В качестве гидратообразующего газа использовался углекислый газ. Исследование проводилось на установке, представляющей собой сосуд высокого давления высотой 300 мм и диаметром 100 мм с термостатируемыми стенками. Максимальное рабочее давление этой установки составляет 25 МПа. Контроль температуры осуществляется с помощью криотермостата LOIP FT-316-40. Перемешивание в рабочей зоне обеспечивается работой мешалки. Сверху установки есть пять отверстий, которые используются для ввода газов, а также для датчиков давления и температуры. Экспериментальное исследование проводилось следующим образом. На рабочий участок помещалось 200 мл воды. Далее, через боковые стенки, производится охлаждение рабочего участка, после чего в камеру закачивается 500 г углекислого газа, который охлаждается и начинает конденсироваться на боковых стенках установки. Из-за меньшей плотности сжиженного углекислого газа он образует слой над поверхностью воды. Уровень воды выбирается таким образом, чтобы лопасти мешалки были расположены на границе раздела слоя воды и сжиженного газа. После того, как на рабочем участке устанавливается температура 2°C и давление 4 МПа, давление сбрасывается различными расходами газа (50, 150, 250, 350 л/мин). В это же время запускается мешалка с постоянной скоростью 1000 об/мин. В результате сжиженный газ кипит и смешивается с водой. Кипящий газ попадает в объем воды, что приводит к дополнительному перемешиванию среды и значительному охлаждению жидкости вокруг пузырьков. В то же время среда попадает в область существования гидрата диоксида углерода, что приводит к образованию на поверхности пузырьков оболочек газового гидрата. При этом выделяемое тепло поглощается при кипячении сжиженного газа. Благодаря сочетанию этих факторов скорость роста массы гидрата газа очень высока. При уменьшении давления на рабочем участке до 2,5 МПа, сброс давления прекращается. При этом давлении соблюдены термо-

барические условия, при которых углекислый газ существует только в газообразном состоянии, а газовый гидрат находится в условиях равновесия. После завершения процесса оценивается масса газа, который переходит в газовый гидрат, для этого производится нагрев рабочего участка. В результате чего полученный образец разлагается на воду и газообразный углекислый газ, который при высвобождении создает дополнительное давление в рабочей зоне. Далее, с помощью уравнений состояния определяется масса газа, перешедшая в газовый гидрат, относительно начальной массы газа (рис. 1). Из рисунка видно, что оптимальная скорость потока газа составляет 250 л / мин, при этом 15,4% массы от начальной массы углекислого газа переходит в гидрат газа. В этих условиях удаляется достаточное количество тепла, которое выделяется при синтезе гидрата. Более высокое потребление приводит к образованию паразитического льда. Хотелось бы отметить, что данный процесс длится менее минуты.

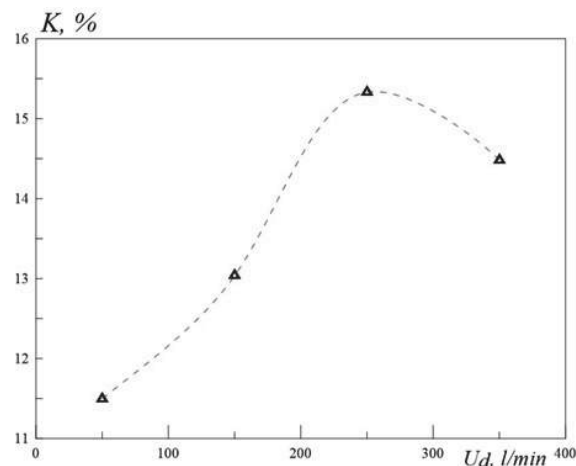


Рис. 1 Влияние скорости декомпрессии U_d , л/мин на массу углекислого газа, переведенного в газогидратное состояние относительно начальной массы газа K , %.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10025)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ГАЗА НА МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЕ СО СТОЯЧЕЙ ЖИДКОСТЬЮ

Гольцман А.Е., Саушин И.И.

ИЭПТ ФИЦ КазНЦ РАН

420111, Россия, Казань, ул. Лобачевского, 2/31

Можно сказать, что классическая теория механики сплошной среды рассматривает два предельных случая обтекания тела сплошной средой: реальной и идеальной жидкостями. В первом случае, вследствие действия касательных сил на поверхности тела принимается так называемое граничное условие прилипания жидкости к поверхности, в то время как для течения идеальной жидкости на стенке имеет место скольжение сплошной среды вдоль поверхности тела. Обе эти фундаментальные задачи подробно исследованы как аналитически, так и экспериментально. Также хорошо известна задача о пограничном слое вдоль поверхности движущегося тела с заданной скоростью. В преобладающем большинстве постановок подобного рода задач, поверхность тела считается твердой и скорость её перемещения известна.

Однако на практике часто встречаются постановки задач с течением газовой среды вдоль свободной поверхности жидкости. Исследование такого течения имеет актуальную практическую значимость. Например, оно встречается в задачах по исследованию распространения нефтяных пятен на поверхности водоемов, в сепарационных технических системах при оценке вероятности брызгоуноса, в химической и энергетической промышленности при охлаждении жидких сред потоком газа.

При течении реального газа на омываемой поверхности тела вследствие условия прилипания возникают касательные напряжения; ввиду отсутствия в жидкости упругих касательных напряжений, это индуцирует движение верхних слоев жидкости. Таким образом, закон движения свободной поверхности определяется сразу несколькими взаимосвязанными факторами – силами вязкости в газе и жидкости, силами поверхностного натяжения на межфазной границе. При увеличении динамического напора газа на поверхности жидкости начнут возникать нестационарные волновые возмущения, способствующие отрыву пограничного слоя.

В данной работе представлены результаты численного моделирования турбулентного пограничного слоя на межфазной границе со стоячей жидкостью

(рис. 1). Численное моделирование выполнено в коммерческом пакете ANSYS Fluent 19.2 по модели многофазного течения Эйлера Volume Of Fluid (VOF) [1] на основе решения осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (уравнения Рейнольдса для осредненного турбулентного движения) для каждой фазы в стационарной и нестационарной постановках.

Рассмотрен случай обтекания при относительно низких числах Рейнольдса, когда динамического напора газа недостаточно для формирования волн на поверхности раздела фаз и возникновения брызгоуноса.

Полученные профили скорости и напряжений Рейнольдса сопоставлены с результатами экспериментальных измерений [2] в развитом турбулентном пограничном слое на твёрдой пластине. Оценена неопределённость эмпирических формул для оценки толщины пограничного слоя, толщин вытеснения и потери импульса пограничного слоя течения газа вдоль гладкой жесткой стенки.

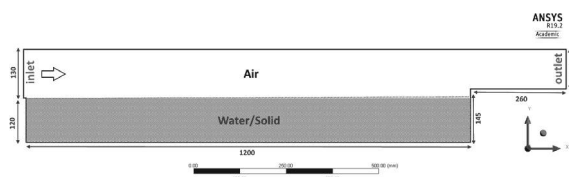


Рис. 1. Схема расчётной области.

Список литературы:

1. Stenmark E. On Multiphase flow models in ANSYS CFD software. Goteborg: Chalmers Reproservice, 2013. 61 p.
2. Mikheev N.I., Goltzman A.E., Saushin, I.I., Dushina O.A. Estimation of turbulent energy dissipation in the boundary layer using Smoke Image Velocimetry // Experiments in fluids. (2017). 58(8). P. 97.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований молодых российских ученых – кандидатов наук (проект №МК-1256.2019.1)

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ИМИТАЦИИ ДОЖДЯ ДЛЯ СЕРТИФИКАЦИИ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Гурьянов А.И., Евдокимов О.А., Веретенников С.В., Гурьянов М.М., Калинина К.Л.

ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева»,
152934, Россия, Рыбинск, пр. Пушкина, 53

Сертификационные испытания авиационного двигателя являются важной частью его комплексной доводки. Имитация процессов обледенения, проверка на попадание птиц во входной направляющий аппарат, испытания заброса града и атмосферного дождя составляют основу проверки летной годности двигателя. Для имитации попадания дождя в двигатель необходимо обеспечить выполнение ряда условий, принятых при сертификации.

Важным для работы систем, имитирующих воздействие атмосферного дождя на рабочий процесс двигателя, является обеспечение комплекса требований по концентрации воды в воздухе, спектру распределения капель по размерам, значению среднедиагонального диаметра капель, расходным характеристикам форсунок и условиям взаимодействия облака капель с потоком воздуха.

На сегодняшний день в России нет установок для имитации атмосферного дождя, в то время как сертификационные требования утверждены. Серийное производство авиационных двигателей российской разработки невозможно без решения отмеченной проблемы сертификации.

Анализ проблем организации макродисперсного распыла показал, что для корректной имитации дождя необходимо обеспечить значение среднего медианного диаметра капель 2,66 мм [1]. Разработана методика расчета термогазодинамических, конструктивных, гидравлических и расходных характеристик установки, имитирующей дождь, для требуемых режимов заброса воды в двигатель; выполнена эмпирическая проработка форсунки. На основе выполнен-

ных расчетных исследований параметров рабочего процесса с целью повышения интегральных параметров эффективности выбрана принципиальная схема установки для имитации дождя и подобраны оптимальные режимы работы.

Спроектирован модуль установки, который состоит из двух независимых коллекторов в форме многоугольных кольцевых магистралей. Каждый коллектор для совместного обеспечения имитации дождя на режимах «малый газ» и «взлет» с условием поддержания концентрации воды в воздухе на уровне 20 г/м³ и значения среднего медианного диаметра капель 2,66 мм [1] содержит в себе по 15 форсунок. Работа на базовых режимах («малый газ», «взлет») и на переходном осуществляется регулированием расхода воды, согласованного с функциями расхода и перепада давления от времени.

Для анализа характеристик потока разработаны и изготовлены пять опытных форсунок, различных в диаметре и геометрических параметрах центрального отверстия. В результате расчетных и экспериментальных исследований разработана форсунка, позволяющая получать значение среднего медианного диаметра 2,656 мм и капли сертификационного спектра.

Список литературы:

1. Авиационные правила. Часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов [Текст]. – 3-е изд., доп. – М.: АВИАИЗДАТ, 2012. – 86 с.

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРИТОКА НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ

Диева Н.Н.¹, Кравченко М.Н.¹, Мурадов А.В.¹, Лищук А.Н.², Евтюхин А.В.¹

¹ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,
119991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1

² ООО «УК Группа ГМС»,
125047, г. Москва, ул. Чайнова, д. 7

Интерес, проявляемый в последнее время к технологии термогазохимического воздействия (ТГХВ) с использованием бинарных смесей (БС), обусловлен преимуществами данного подхода как с экономической эффективностью, так с физикотехнологической управляемостью процесса. Данная технология относится к методам термообработок локализованных зон пласта и основана на применении энергии разложения взрывчатых веществ.

Технология ТГХВ может стать прорывной для разработки месторождений трудноизвлекаемых углеводородов, характеризующихся малой пористостью, низкой проницаемостью, высокой неоднородностью строения и различной степенью зрелости насыщенных пород.

Принцип организации ТГХВ состоит в последовательной закачке в пласт определенного объема водного раствора бинарной смеси неорганических солей, буферной воды, катализатора реакции разложения БС (в виде кислоты или формалина), стабилизатора (замедляющего реакцию), продавочной воды. Замедлители реакции приостанавливают реакцию взаимодействия реагентов, и тем самым позволяют осуществить закачку в пласт необходимого объема продавочной жидкости (обычно воды) для отдаления зоны реакции на безопасное расстояние от забоя скважины. Технологические схемы организации процесса изменялись в последние годы с переходом к более управляемым и безопасным методам, принципиально отличающимся химическими агентами катализаторов и замедлителей реакции, последовательностью их подачи в пласт, объемами и т.д. [1].

Настоящая работа посвящена численному моделированию развития процесса ТГХВ в пористых насыщенных средах. Математическая модель включает систему дифференциальных уравнений, описывающих законы сохранения энергии, массы и движения и замыкающие соотношения, описывающие физико-химические свойства всех фаз и компонент рабочих агентов, которые уточняются по данным промысловых или лабораторных опытов.

С 2009 года авторами работы проводились сопроводительные оценочные расчеты по формированию полей давления и температуры при организации ТГХВ на месторождениях Татарстана, Краснодарского края, Западной Сибири [2–4]. При этом численный расчет проводился в несколько этапов, отвечающих периоду оценки состояния скважин-кандидатов, оценке положения зоны реакции по объемам закачки агентов; развитию реакции с формированием зоны повышенного давления и температуры; распространению по пласту волн давления и температуры, изменению состояния пластового флюида и пористой матрицы в последующий период.

Гидродинамический анализ и обобщение результатов промысловых экспериментов по закачке активных составов позволяет сделать выводы об эффективности данной технологии для различных коллекторов.

1. Интенсивность воздействия от разложения БС сильно зависит от концентрации и объемов закачиваемых агентов. В результате экзотермической реакции разложения ВВ пласт относительно медленно прогревается в дренируемой зоне, но временной период теплового прогрева имеет прологированный характер относительно короткого интервала развития реакции

2. Активно выделяющиеся в процессе реакции газы (продукты реакции) достаточно быстро повышают давление не только в месте локализации бинарной смеси, но и в окружающей зоне из-за самоускоряющегося характера развития реакции.

3. В случае недостоверности данных об исходном состоянии коллектора оценка результативности воздействия носит лишь качественный характер.

4. Для составления адекватной гидродинамической модели процесса осуществления ТГХВ важно предварительное проведение гидродинамических исследований скважин-кандидатов, выявляющих действующие на текущий момент фильтрационно-емкостные свойства пород.

5. Особый интерес представляет организация ТГХВ на залежах, содержащих в составе кероген. Однако для этого крайне необходимы новые лабораторные исследования и достаточное компьютерное сопровождение.

Список литературы:

1. Александров Е.Н., Леменовский Д.А., Петрищев В.Ф. Способ и устройство для термохимической обработки продуктивного пласта. // Патент на изобретение 2224103. Россия. – 2004. – Режим электронного доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/222/2224103.html>
2. Пестриков А. В., Башаров А. Р., Кравченко М. Н. Универсальный подход к математическому моделированию класса технических задач о притоке флюида к трещине гидроразрыва пласта. – Вестн. Удмуртск. ун-та. Матем. . Компьют. Науки. – 2009 – № 4. – с. 107–117.
3. Вольпин С.Г., Смирнов Н.Н., Кравченко М.Н., Корнаева Д.А., Саитгареев А.Р., Диева Н.Н. Перспективы применения волновой технологии термогазохимического воздействия для повышения нефтеотдачи пластов. // Нефтяное хозяйство. – 2014. – №1 – С.62–66.
4. Кравченко М.Н., Диева Н.Н., Лищук А.Н., Мурадов А.В., Вершинин В.Е. Гидродинамическое моделирование термохимического воздействия на низкопроницаемые керогеносодержащие коллекторы. // Георесурсы. – 2018. – Т.20. – №3. – С.178–183.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №19-07-00433 А

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ПЕРЕГРЕТОЙ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ ВОДЫ В КОНФУЗОРНО-ДИФфуЗОРНЫХ СОПЛАХ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ДИСПЕРСИОННЫЙ СОСТАВ ФАКЕЛА РАСПЫЛА

Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А., Низовский В.Л., Низовский Л.В., Щигель С.С.

Объединённый институт высоких температур РАН,
125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13 стр. 2

Представлены новые данные по расчету течения перегретой метастабильной воды в форсунках типа сопла Лавала при ее распылении.

Распылы перегретой воды могут быть использованы при впрысках в контур газотурбинных установок (ГТУ и ПГУ), охлаждении различных поверхностей методом «spray cooling» и в новых методах пожаротушения.

В данной работе расчетные исследования, как и в предыдущей (в основном экспериментальной) работе [1], проведены с соплами, имеющими после узкого «горла» расширяющуюся часть сравнительно большей протяженности.

Источником дисперсной паро-капельной струи в проведенных опытах являлись форсунки, питаемые водой с температурой перед соплами от 170 до 240°C и давлением от 2,0 до 4,0 МПа. Диаметр горловины сопел в опытах составлял 0,7 и 1,6 мм. Проводились измерения распределений температуры, скорости и давления двухфазного потока в указанных соплах. Одновременно определялись дисперсионные характеристики факелов распыла в микронном и субмикронном диапазонах размеров капель. Они находились через измерение индикатрис рассеяния монохроматического излучения в широком диапазоне углов с применением теории Ми. Опыты проводились с помощью системы измерения рассеянного излучения, которая на настоящем этапе исследований была модернизирована с учетом большой оптической плотности изучаемых высокодисперсных факелов распыла перегретой воды. Это позволило более точно учитывать влияние вторичного многократного рассеяния лазерного излучения.

Процессы нуклеации во вскипающей метастабильной воде, быстрого роста в ней паровой фазы и их взаимная связь с параметрами двухфазного течения были проанализированы применительно к условиям экспериментов. Рассматривалась задача о течении метастабильной перегретой воды в соплах указанной выше геометрии.

Математическая модель, включающая уравнения сохранения, а также уравнения, описывающие процесс образования зародышей паровой фазы, их образование и развитие была дополнена расчетом изменения скорости с учетом влияния выделения растворенного воздуха при падении давления (до достижения давления насыщения пара). При этом учитывалось заметное изменение скорости звука в рассматриваемой двухфазной среде как в «пузырьковой» жидкости, так и после ее превращения в паро-капельный поток. Испарение капель в диффузоре оценивалось в соответствии с [2].

Расчетные данные сравниваются с результатами анализируемых экспериментов. При этом были выяв-

лены два режима: дозвуковой, при котором образуется поток распыляемой жидкости с той или иной степенью бимодальности, и сверхзвуковой (как правило, в диффузорной части), в котором, согласно проведенным расчетным оценкам, обеспечивается при достаточном перегреве, практически одномодальное субмикронное дисперсионное распределение.

Приводятся распределения давления, скорости, числа Маха, температуры, объемной доли пара по длине сопла для характерных режимов при начальных температурах 200–240°C и диаметрах горловины сопла 1,6 и 0,7 мм.

При этом показано, что «взрывное» парообразование, после которого происходит переход потока в паро-капельное состояние, имеет место в первой четверти по длине диффузора.

Это было подтверждено экспериментально путем проведения опытов по диспергированию метастабильной перегретой воды при начальных температурах 170, 200 и 240°C при последовательном сокращении длины сопла и наблюдаемых изменениях факелов распыла.

Наблюдается хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных при коэффициенте гетерогенности (в уравнении для скорости нуклеации) в диапазоне 0,001–0,002, что соответствует данным [3].

Наряду с рассмотренным в [1] подходом к обобщению расчетных и экспериментальных данных предложен критерий полного распыления перегретой воды («full flashing») в субмикронном диапазоне капель. В качестве такого критерия рассматривается отношение химического потенциала фазового перехода к энергии поверхностного натяжения применительно к пузырьку критического радиуса при максимальной скорости нуклеации. Такой критерий позволяет провести обобщение известных опытов по высокодисперсным распылам не только перегретой воды, но и других жидкостей.

Список литературы:

1. Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А., Низовский В.Л., Низовский Л.В., Щигель С.С. / О возможности получения бимодальных и одномодальных распылов перегретой метастабильной воды в микронном и субмикронном диапазоне капель / III Всероссийская научная конференция Теплофизика и физическая гидродинамика, Ялта, 10–16 сентября 2018 г. С. 110.
2. Labuntsov D.A., Kruykov A.P. / Analysis of intensive Evaporation and condensation / Int. J. Heat and MASS Transfer. 1979. Vol.22. P. 989–1002.
3. Кумзерова Е.Ю. / Численное исследование образования и роста пузырей пара в условиях падения давления жидкости Диссертация на соискание уч. степени к.ф.м.н / Физикотехнический институт им. А.Ф. Иоффе РАН. Санкт-Петербург. 2004. 103 с.

Работа поддержана РФФИ, грант № 19-08-00504

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ С ДИСПЕРГИРОВАННЫМИ ЧАСТИЦАМИ В КАНАЛЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Замула Ю.С., Юлмухаметова Р.Р., Гимадеев А.В., Мусин А.А., Ковалева Л.А.

Башкирский государственный университет, Уфа,
450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

Проблема перемещения взвешенных в жидкости частиц в различных гидросистемах имеет место во многих отраслях промышленности и природных процессах. Перед нефтегазовой отраслью такая проблема стоит при решении задачи разделения водонефтяных эмульсий в потоке [1] или при применении технологии гидравлического разрыва пласта [2]. В первом случае проблема связана с поиском режимов, при которых происходит расслоение дисперсной системы, во втором случае – с транспортировкой расклинивающего наполнителя вглубь трещины и закупориванием трещин.

В данной работе исследуется течение вязкой несжимаемой жидкости со взвешенными твердыми сферическими частицами в канале прямоугольного сечения с использованием методов физического и математического моделирования. Целью работы является поиск и выявление закономерностей движения и распределения частиц в потоке.

Лабораторная установка собрана в виде исследовательского стенда (см. рис. 1.). Основным элементом стенда является экспериментальная ячейка, которая представляет собой вертикальный канал прямоугольного сечения, изготовленный из оргстекла, внутренняя полость которого имеет размер $500 \times 40 \times 2$ мм. В качестве рабочей жидкости используется глицерин.

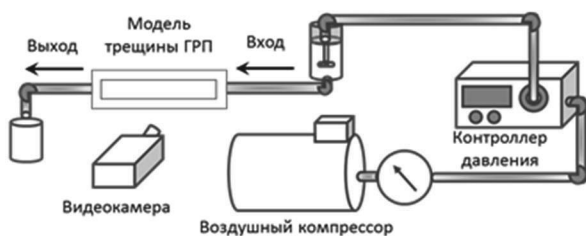


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

На рис. 2. приведена картина распределения твердых частиц в потоке жидкости, полученная при следующих исходных параметрах системы: в начальный момент времени начальный участок канала на 90% насыщен твердыми частицами, на вход канала подается жидкость со взвешенными твердыми частицами с начальной концентрацией частиц 10%. Динамическая вязкость жидкости равна $0,7 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Величина избыточного давления составляет 100 Па.

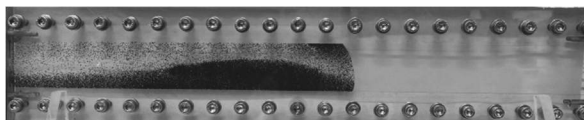


Рис. 2. Распределение твердых частиц в жидкости.

Видно, что сформированный на начальном участке канала вал из твердых частиц уносится потоком жидкости вдоль канала. При этом образуются две об-

ласти с высокой концентрацией твердых частиц: в нижней и в верхней частях канала, что объясняется образованием вихревых структур на фронте вытеснения. В данном эксперименте рассматриваются условия, при которых характерная скорость оседания твердых частиц меньше характерной скорости течения жидкости вдоль канала, поэтому большая часть частиц не успевает осесть, в нижней части канала формируется лишь небольшой слой, состоящий из твердых частиц.

Математическое моделирование процесса производится в соответствии с условиями эксперимента методом контрольных объемов в программном комплексе OpenFoam. Математическая модель записывается в диффузионном приближении и включает в себя систему уравнений Навье-Стокса, уравнение неразрывности и уравнение диффузии, записанные с учетом действия на частицы гравитационных сил. Считается, что жидкость несжимаемая, твердые частицы имеют сферическую форму и одинаковый размер, течение ламинарное. Нагнетание жидкости со взвешенными твердыми частицами происходит при заданном перепаде давления, на твердых границах канала задано условие прилипания, на выходе задано условие протекания. Результаты представлены в виде распределения концентрации частиц в канале (см. рис. 3.).

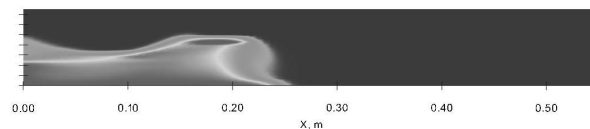


Рис. 3. Распределение концентрации частиц в жидкости.

Проводятся адаптация модели в условиях эксперимента и многопараметрические исследования задачи распределения частиц в потоке и осадконакопления по длине канала в зависимости от физических свойств среды и геометрических размеров области.

Список литературы:

1. Мусин А. А., Тухбатова Э. Р., Анисенкова Н. А. Исследование интенсивности расслоения высоковязкой водонефтяной эмульсии в емкости с нагретыми боковыми стенками // Вестник Башкирского университета // 2017, Т. 22, №3, С. 908–913
2. Аксаков А. В., Борщук О. С., Желтова И. С., Дедулин А. В., Калуджер З., Пестриков А. В., Торопов К. В. Корпоративный симулятор гидроразрыва пласта: от математической модели к программной реализации // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 11. – С.35–40.

Работа выполнена при поддержке гранта
Российского научного фонда
(проект №19-11-00298)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЧ И СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА РАЗРУШЕНИЕ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

Зиннатуллин Р.Р., Султангузин Р.Ф., Габдрафиков А.Ф., Гайнетдинов Э.Ф., Ковалева Л.А.

Башкирский государственный университет,
450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

При промышленном обезвоживании водонефтяных эмульсий в основном используется химические реагенты – деэмульгаторы. Химические способы обезвоживания водонефтяных эмульсий – дорогостоящие и экологически небезопасные. В качестве альтернативного способа можно эффективно использовать электромагнитные (ЭМ) поля высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазонов. При ВЧ ЭМ воздействии эффект достигается за счет поляризации полярных компонент нефти (асфальтены, смолы), при СВЧ воздействии – за счет поляризации молекул воды. Кроме того, в случае двухфазных жидкостей, какими являются водонефтяные эмульсии, при определенном соотношении фаз преимущественно проявляется и поверхностная поляризация на границе раздела фаз. Поэтому актуальной задачей при разработке электромагнитных методов обезвоживания нефтей является исследование особенностей воздействия электромагнитных полей ВЧ и СВЧ диапазона на водонефтяные эмульсии с различными физико-химическими свойствами при определенных параметрах электромагнитного поля и выявления закономерностей поведения водонефтяных эмульсий в ВЧ и СВЧ электромагнитных полях[1].

При ВЧ электромагнитном воздействии электромагнитная энергия рассеивается и переходит в тепловую энергию в бронирующей оболочке, окружающей каплю воды. Максимальная эффективность этого процесса достигается при попадании частоты накладываемого ВЧ электромагнитного поля в область резонансных частот колебаний высокомолекулярных полярных компонентов нефти. При этом, кроме теплового воздействия, включается механизм разрушающего действия поля на структуру высокомолекулярных соединений нефти.

Выбор СВЧ диапазона обосновывается тем, что нефть содержит водную фазу, диэлектрические параметры которой имеют область дисперсии в СВЧ области. Это дает возможность использования энергии электромагнитного поля СВЧ диапазона при разработке технологии обезвоживания нефтей. Известно, что с ростом содержания воды в эмульсии область резонансных частот для неё незначительно смещается в область низких частот [2].

В качестве объектов исследования были использованы модельные водонефтяные эмульсии, приготовленные на основе реальных нефтей и соответствующих пластовых вод. Были приготовлены обратные водонефтяные эмульсии с содержанием водной фазы 30, 50, 80% на верхнеприводной мешалке при скорости вращения 3000 об/мин в течение 45 мин при комнатной температуре. Так как степень воздействия ВЧ электромагнитного поля на нефть или эмульсию зависит от диэлектрических параметров и их дисперсии, были определены области резонансных частот для исследуемых нефтей (см. рис. 1).

Был изготовлен лабораторный стенд, позволяющий исследования ВЧ и СВЧ воздействия на водонефтяные эмульсии в динамическом режиме. (см. рис. 1) состоит из 8 основных узлов: 1 – емкость для эмульсии, 2 – мерный цилиндр, 3 – насосная станция, 4 – ВЧ реактор, 5 – регистратор температуры, 6 – ВЧ генератор, 7 – СВЧ камера, 8 – система магнетронов.

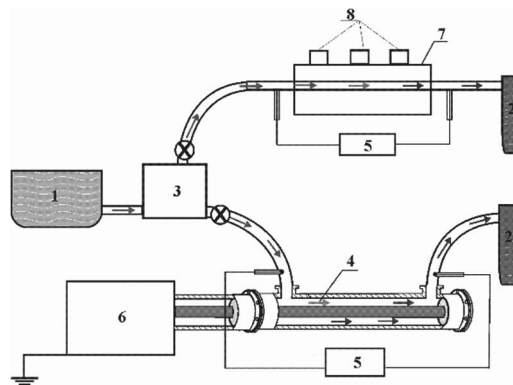


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторного стенда для ВЧ и СВЧ электромагнитного воздействия на водонефтяные эмульсии в динамическом режиме.

В результате проведенных исследований обнаружено, что при воздействии ВЧ ЭМ или СВЧ электромагнитными полями на водонефтяные эмульсии степень воздействия и эффективность расслоения эмульсии зависят от суммарного содержания асфальтенов и смол, содержания воды в эмульсии, попадания рабочей частоты генератора в область резонансных частот для эмульсий.

Показано, что при низких содержаниях воды для всех типов эмульсий ВЧ ЭМ воздействие эффективнее, чем СВЧ. С ростом содержания воды возрастает эффективность СВЧ воздействия. Кроме того, с ростом содержания воды растет интенсивность нагрева эмульсии в СВЧ поле при одних и тех же энергозатратах.

Список литературы:

1. Kovaleva L. A., Minnigalimov R. Z., Zinnatullin R. R. Destruction of water-in-oil emulsions in radio-frequency and microwave electromagnetic fields //Energy & Fuels. 2011. Т. 25. №8. С. 3731.
2. Ковалева Л.А., Миннигалимов Р.З., Зиннатуллин Р.Р. К исследованию диэлектрических и реологических характеристик водонефтяных эмульсий //ТВТ. 2008. Т. 44. №5. С. 792.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-11-00298)

Кашкарова М.В., Наумов И.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Биореакторы широко используются в биотехнологической промышленности. Основным критерием при выращивании различных культур является выбор и создание оптимальных условий для их жизнедеятельности, а именно обеспечение дыхания, питания и т.д. Изучение процессов массопереноса в биореакторах необходимо для оптимизации их работы.

Одной из простейших моделей биореакторов является установка, состоящая из цилиндрического сосуда с вращающейся верхней крышкой. Крышка вращается с постоянной угловой скоростью. После начала вращения крышки при небольших числах Рейнольдса в потоке образуется классический вихрь Тейлора. При увеличении скорости вращения в результате увеличения градиента давления в центральной части установки образуется так называемый «пузырь» - самостоятельная вихревая структура. Рабочей жидкостью в сосуде может выступать как однокомпонентная жидкость, так и две несмешивающиеся жидкости. Основными параметрами в такой установке являются относительное удлинение (отношение высоты столба жидкости в цилиндрическом сосуде к его радиусу) и число Рейнольдса.

В работе [1] проведена классификация структур течения в контейнере с вращающимся дном и открытой свободной поверхностью. В настоящей работе все типы структур течений получены для цилиндрического контейнера с вращающейся крышкой и двухкомпонентной несмешивающейся рабочей жидкости. Моделирование проводилось с помощью пакета STAR CCM+. Для описания движения потока жидкости в сосуде использовалась система стационарных уравнений Навье-Стокса в цилиндрических координатах. Система дополнена уравнением неразрывности. Считаем систему осесимметричной, и на нее из внешних сил действует лишь сила тяжести. Для получения безразмерных уравнений были использованы такие параметры подобия как число Рейнольдса, число Эйлера и число Фруда:

$$\text{Re} = \frac{2U \cdot R}{\nu}; \quad \text{Eu} = \frac{P}{\rho \cdot U^2}; \quad \text{Fr} = \frac{U^2}{g \cdot R}.$$

В итоге получили систему для описания осесимметричного стационарного потока жидкости:

$$\begin{cases} U_r \frac{\partial U_r}{\partial r} + U_z \frac{\partial U_r}{\partial z} - \frac{U_\theta^2}{r} = \\ = -Eu \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{2R}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 U_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 U_r}{\partial z^2} - \frac{U_r}{U \cdot r^2} \right) \\ U_r \frac{\partial U_\theta}{\partial r} + U_z \frac{\partial U_\theta}{\partial z} - \frac{U_r U_\theta}{r} = \\ = \frac{2R}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 U_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 U_\theta}{\partial z^2} - \frac{U_\theta}{U \cdot r^2} \right) \\ U_r \frac{\partial U_z}{\partial r} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} = \\ = \frac{1}{\text{Fr} \cdot R} - Eu \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{2R}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 U_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} \right) \end{cases}$$

В качестве граничных условий использовались условия прилипания и непротекания на стенке и на дне. Верхняя крышка считалась равномерно вращающейся со скоростью Ωr . Для случая двухкомпонентной рабочей жидкости добавлялось условие равенства касательных напряжений на границе раздела сред.

В результате получена диаграмма зависимости числа Рейнольдса от относительного удлинения с указанием областей, соответствующих различным типам структур течений.

Список литературы:

1. M. Brøns, L. K. Voigt, J. N. Sørensen J. Topology of vortex breakdown bubbles in a cylinder with a rotating bottom and a free surface. // Fluid Mech. 2001. Vol. 428. P. 133–148.

*Работа выполнена при поддержке
проекта РФФ №19-09-00083*

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ НА ДВИЖЕНИЕ ГРАНИЦЫ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЫВА В ДВУХСЛОЙНЫХ СИСТЕМАХ

Клюев Д.С., Флягин В.М., Иванова Н.А.

Тюменский государственный университет,
625003, Россия, Тюмень, ул. Володарского, 6

Тепловые поля оказывают существенное влияние на движение границы пленки одной жидкости по поверхности другой. Исследование данного процесса имеет большое прикладное значение при создании микрофлюидных оптических устройств [1].

В текущей работе приведены предварительные результаты исследования зависимости скорости перемещения границы термокапиллярного (ТК) разрыва пленки от времени при наличии и отсутствии теплового поля в двухслойной жидкостной системе со свободной поверхностью. В качестве верхнего слоя использовали гексадекан, с диапазоном толщин 300–600 мкм, в роли нижнего – глицерин с фиксированной толщиной 2 мм и диаметром 60 мм.

Формирование разрыва верхнего слоя производили двумя способами: (1) пучком лазерного излучения [2]; (2) направленной воздушной струей (см. рис. 1).

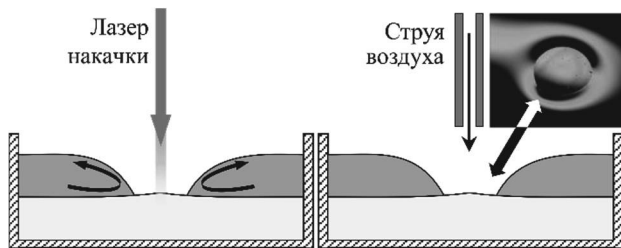


Рис. 1. Схема создания разрыва в верхнем слое жидкости системы гексадекан-глицерин.

После того, как разрыв верхнего слоя достигал максимального диаметра, равного 11.26, 6.68, 2.86, 1.68 мм для слоев 300, 400, 500 и 600 мкм, соответственно, лазерный пучок / струю воздуха перекрывали и измеряли время релаксации разрыва (см. рис. 2).

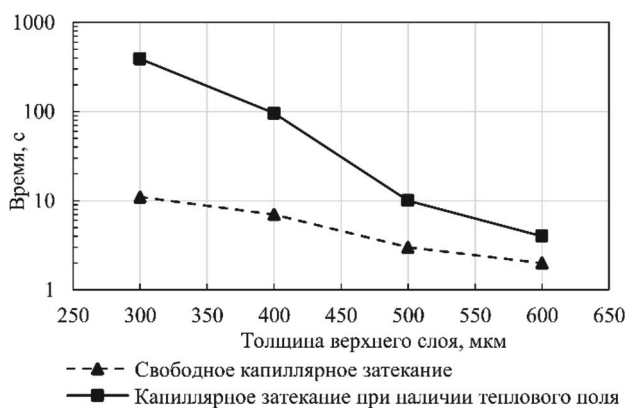


Рис. 2. Зависимость времени затекания верхнего слоя для различных толщин при наличии / отсутствии теплового поля.

На рис. 2 видно, что время затекания ТК разрыва, почти на порядок больше по сравнению со временем релаксации разрыва, вызванного струей воздуха. Очевидно, что такая разница во времени обусловлена

наличием остаточного, после выключения лазера, теплового поля, которое поддерживает ТК течения в верхнем слое, препятствуя капиллярному затеканию разрыва. Опыты показали, что для каждой толщины верхнего слоя существует свой перепад температуры, при котором максимальный диаметр ТК разрыва поддерживается в стационарном состоянии (см. рис. 3).

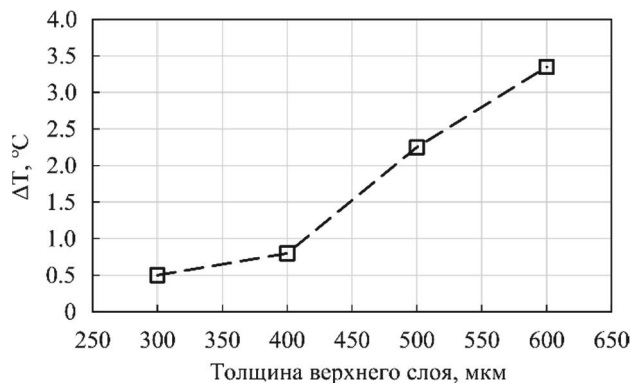


Рис. 3. Зависимость изменения минимальной разницы температур (относительно окружающей среды), необходимой для поддержания границы разрыва в стационарном состоянии, от толщины верхнего слоя.

Исходя из полученных результатов можно предположить, что скорость затекания трехфазной границы в случае ТК разрыва в большей степени определяется скоростью перемещения соответствующей изотермы, ΔT . В свою очередь, ТК течения являются дополнительным теплоотводом, который способствует рассеиванию теплового поля за счет притока с периферии менее нагретой жидкости, что ускоряет движение трехфазной границы. Нужно отметить, что рассеивание теплового поля внутри слоя глицерина происходит только за счет медленного кондуктивного механизма, так как из-за высокой вязкости глицерина ТК течения в нем отсутствуют.

Таким образом, выравнивание теплового поля ведет к ослаблению ТК течений в верхнем слое, что способствует уменьшению диаметра разрыва.

Список литературы:

1. Klyuev D.S., Fliagin V.M., Al-Muzaiqer M., Ivanova N.A. Laser-actuated optofluidic diaphragm capable of optical signal tracking // Appl. Phys. Lett. 2019. V. 114, Issue 11, P. 011602–1–5
2. Ivanova N.A., Starov V.M., Trybala A., Flyagin V.M. Removal of micrometer size particles from surfaces using laser-induced thermocapillary flow: Experimental results // Journal of Colloid and Interface Science. 2016. V. 473, P. 120–125

Работа поддержана РФФИ
(гранты № 18-31-00231, № 17-08-00291)

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА
И ГИДРОДИНАМИКИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ****Королева А.П.¹, Французов М.С.^{1,2}, Александров В.Ю.¹**¹ Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова,
111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

В настоящее время большую для накопления и использования тепловой энергии все чаще используются подогреватели прерывного действия. В качестве материала внутри таких подогревателей используется специальная пористая среда в том числе сформированная шаровыми элементами. Комплексное расчетно-экспериментальное исследование гидродинамических и теплообменных особенностей в таких пористых средах является важной и актуальной задачей для современной теплофизики. Использование пористой среды находит свое применение в атомной промышленности, в энергетической промышленности, в авиационной промышленности, где пористая среда используется в качестве основного элемента кауперного подогревателя воздушного потока.

В настоящей работе представлены результаты комплексного расчетно-экспериментального исследования гидродинамических и теплообменных процессов в пористой среде, сформированной шаровой засыпкой. Расчетное исследование проводилось в несколько этапов. Для приближенных одномерных расчетов использовалась модифицированная модель Шумана, основанная на решении системы дифференциальных уравнений в квадратурах. Это позволило провести интегральную оценку изменения температуры твердой матрицы и газового потока по времени. Дальнейшее расчетное исследование проводилось с использованием современных программ численного моделирования, в которых решаются полные нестационарные уравнения Навье-Стокса осредненные по Фавру. В двумерном подходе рассматривалось движение газового потока с переменными теплофизическими свойствами в пористой среде с определенными коэффициентами теплоотдачи. При трехмерном мо-

делировании задача решалась в полной постановке с описанием порового пространства, сформированного шаровой засыпкой. На основании комплексного решения были получены интегральные характеристики прогрева и остывания пористой среды, а также тепловые и гидравлические характеристики для процесса нагрева и остывания.

Для валидации проведенных расчетов была разработана и создана модельная экспериментальная установка, в которую помещались шаровые элементы, выполненные из различных материалов (сталь, корунд, фарфор), геометрическое расположение шаров было близко к кубической упаковке. В результате воздействия высокотемпературного газового потока (1200 К) осуществлялся нагрев шаров до температуры 1000 К. Проводилось измерение температуры как самих шаровых элементов, так и температуры газового потока. Затем шаровая упаковка обдувалась потоком холодного воздуха до полного остывания. В результате проведенной валидации установлено, что характер изменения температур одинаковый, при этом количественные отличия не превосходят 10%. Для тепловой характеристики теплообмена (зависимости числа Нуссельта от Рейнольдса) отличие было не более 7%. Измерение гидравлических характеристик не проводилось.

В результате проведенного комплексного расчетно-экспериментального исследования установлено, что используемая расчетная методика правомерна для диапазона чисел Рейнольдса от 500 до 10000, для шаровых элементов, выполненных из стали, корунда, фарфора, температур нагрева 1000–1200 К.

**ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕННИКОВ
С ОБЪЕМНЫМИ ИНТЕНСИФИКАТОРАМИ****Лаптев А.Г.¹, Фарахов Т.М.², Афанасьев Е.П.³**^{1,2} ФГБОУ КГЭУ,

420066, Россия, Казань, ул. Красносельская, 51

³ ООО «Газпром переработка»,

194044, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Смолячкова, дом 6, корпус 1

В промышленной нефтехимии и нефтегазопереработке, а также на тепловых станциях применяются процессы нагрева или охлаждения жидких углеводородных смесей с повышенной вязкостью и большими числами Прандтля. К таким жидкостям относятся: мазут, минеральные и синтетические масла и другие продукты переработки нефти. В связи с повышенной вязкостью, особенно при невысоких температурах, движение углеводородных сред в каналах теплообменного оборудования происходит при ламинарном режиме. Известно, что при ламинарном режиме коэффициент теплоотдачи значительно меньше, чем при турбулентном. Поэтому актуальной задачей является разработка интенсифицированных теплообменных аппаратов, которые при небольших числах Рейнольдса обеспечивают турбулизацию вязких сред, а также физическое и математическое моделирование таких процессов.

Известны ряд научных школ, которые занимались и занимаются в настоящее время интенсификацией теплообмена в различных аппаратах. Это в первую очередь ученые А.И. Леонтьев, Г.А. Дрейцер, В.А. Кирпиков, Л.М. Коваленко, Ю.М. Бродов, Ю.Я. Назмеев, Ю.Ф. Гортышов, В.К. Мигай, А.А. Жукаускас, А.В. Щукин, И.А. Попов, А.А. Гухман и др. Большинство работ в этой области посвящено исследованию интенсификации теплообмена в аппаратах с турбулентным режимом работы и значительно меньше – при ламинарном. Однако, именно ламинарный и переходный режимы течения теплоносителей являются наиболее перспективной областью применения методов интенсификации конвективного теплообмена.

В данной работе выполнено экспериментальное исследование процесса нагрева индустриального масла на лабораторном стенде. Показано применение моделей структуры потоков для расчета тепловой эффективности теплообменников с насадками и витыми элементами и энергетических комплексов для сравнительной теплогидравлической эффективности различных интенсификаторов.

При исследовании на экспериментальном стенде получены данные по теплообмену в аппарате типа «труба в трубе», где во внутренней трубе в качестве объемного интенсификатора размещалась мелкая хаотичная металлическая насадка «Инжехим 2012» [1]. Получены экспериментальные значения средних коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи в трубе с насадкой для масла марки И-8А, а также гидравлического сопротивления. Показано согласование опыт-

ных значений коэффициентов теплоотдачи с расчетными по известным выражениям [2].

Предложен модифицированный метод теплового числа единиц переноса для учета обратного перемешивания теплоносителя в трубе с насадкой и витыми элементами, где параметры находятся на основе применения диффузионной модели структуры потока теплоносителя. В результате получено выражение, которое позволяет в явном виде вычислять поверхность и эффективность теплопередачи в каналах с интенсификаторами с учетом обратного перемешивания теплоносителей.

С применением ячеечной модели структуры потоков теплоносителей в каналах с хаотичными элементами (насадками и проточными витыми) получены выражения для расчета температурных профилей и локальных чисел Нуссельта по длине каналов с учетом изменения теплофизических свойств среды, как при нагреве, так и охлаждении сред.

В результате экспериментальных исследований при нагреве индустриального масла горячей водой в теплообменнике типа «труба в трубе» установлено, что за счет размещения хаотичной насадки во внутренней трубе, где теплоносителем является масло, происходит повышение коэффициента теплоотдачи в 14–15 раз при числе Рейнольдса для масла $Re_m = 170–270$, и для горячей воды $Re_v = 10^4$, при температурах 40–50°C. Получены выражения в виде отношений коэффициентов теплоотдачи в трубе без насадки (объемных интенсификаторов), к коэффициентам теплоотдачи с интенсификацией хаотичной насадкой, как для ламинарного, так и турбулентного режимов. Предложен модифицированный метод теплового числа единиц переноса, который позволяет учесть обратное перемешивание теплоносителя в каналах с различными хаотичными элементами в расчетах поверхности и эффективности теплопередачи. Разработан алгоритм расчета с учетом структуры потока по ячеечной модели поверхности и эффективности теплопередачи в теплообменнике с хаотичными насадками и витыми элементами.

Список литературы:

1. Фарахов М.М., Фарахов Т.М., Лаптев А.Г. Гидравлические характеристики хаотичной насадки «Инжехим» для контакта газа и жидкости // Фундаментальные исследования. 2018. №3. С. 24–28.
2. Лаптев А.Г., Фарахов Т.М. Математическая модель теплоотдачи в каналах с насадочными и зернистыми слоями // Теплоэнергетика. 2015. №1. С. 77–80.

ОБОБЩЕННЫЙ ЗАКОН МНОГОФАЗНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И НОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЯХ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Максимов В.М.

Институт проблем нефти и газа РАН,
119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 3

Анализируется обобщенный закон многофазной фильтрации, явно учитывающий вязкостное взаимодействие между флюидами, капиллярные и гравитационные эффекты. Рассмотрен частный случай – двухфазное фильтрационное течение как основа технологии заводнения нефтяных пластов, а также приводится способ определения новых материальных функций – «перекрестных» фазовых проницаемостей – и их количественный вклад в показатели разработки месторождения. Выявлен новый эффект зависимости капиллярных сил от направления течения в анизотропных средах.

Описание движения многофазных многокомпонентных сред, сопровождающегося взаимосвязанными физико-химическими, различными релаксационными и другими процессами, достигает достаточной полноты и логической стройности при использовании методов неравновесной термодинамики.

Специфика подхода, представленного в настоящей работе, состоит в том, что отправляясь от законов сохранения для всего континуума в целом и применяя методы неравновесной термодинамики, можно вывести уравнения движения фаз и получить законы межфазного взаимодействия. Уравнения движения представлены в виде обобщенных соотношений Стефана-Максвелла, куда входит симметричная матрица бинарных коэффициентов сопротивления. Показано [1], что эти коэффициенты связаны с многофазными коэффициентами относительных фазовых проницаемостей (ОФП) $k^{\alpha\beta}$ системой алгебраических уравнений.

Представление уравнений движения в виде, разрешенном относительно действующих сил, имеет двойное преимущество.

Во-первых, определение бинарных коэффициентов $R^{\alpha\beta}$ сопротивления с помощью стандартных экспериментов по совместному движению двух фаз в пористой среде дает принципиальную возможность вычисления многофазных относительных фазовых проницаемостей $k^{\alpha\beta}$ путем решения алгебраической системы уравнений. Отметим, что методы прямого экспериментального определения относительных фазовых проницаемостей отсутствуют даже для трехфазных систем.

Во-вторых, уравнения фильтрации в такой форме, будучи подставленными в уравнения неразрывности, приводят к уравнениям, не разрешенным относительно старшей производной. Это создает определенные трудности в решении задач при численной реализации.

В качестве частного случая модели гетерогенной многофазной смеси [2] исследована обобщенная модель процесса двухфазного вытеснения, учитывающая эффекты неравновесности, вязкостного взаимодействия между флюидами и дополнительные «перекрестные» фазовые проницаемости. В основе модели – зависимость скорости фильтрации w_α α – фазы от градиентов давлений ∇p_α во всех фазах, так что для изотермического течения имеем:

$$\vec{w}_\beta = - \sum_{\alpha=1}^{\Phi} \lambda_{\alpha\beta} (\nabla p_\alpha - \rho_\alpha g), (\beta = 1, 2, \dots, \Phi).$$

Здесь коэффициенты $\lambda_{\alpha\beta}$ имеют смысл обобщенных подвижностей фаз. При этом недиагональные коэффициенты матрицы $\lambda_{\alpha\beta}$ ($\alpha \neq \beta$) обусловлены вязким взаимодействием между флюидами, а диагональные коэффициенты представляют вклад обеих фаз в суммарный поток. Показано [2], что коэффициенты $\lambda_{\alpha\beta}$ могут быть выражены через стандартные подвижности для противоточной капиллярно-гравитационной пропитки и однонаправленного вытеснения при больших скоростях фильтрации. Для определения последних достаточно проведения двух независимых экспериментов (по однонаправленному вытеснению и капиллярной пропитке). Дается пример количественного вклада «перекрестных» ОФП в показатели вытеснения по сравнению с классической моделью.

Список литературы:

1. Колесниченко А.В., Максимов В.М. Обобщенный закон фильтрации Дарси как следствие соотношений Стефана-Максвелла для гетерогенной среды // Препринт № 15. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 1999. 31 с.
2. Максимов В.М. Обобщенный закон многофазной фильтрации и «перекрестные» эффекты при вытеснении нефти водой // Математическое моделирование РАН. 2015. Т. 27. № 11. С. 21–31.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИНТЕЗА ГАЗОВОГО ГИДРАТА ФРЕОНА 134А В ЦИКЛИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ КИПЕНИЯ-КОНДЕНСАЦИИ

Мелешкин А.В.¹, Барташевич М.В.¹, Глезер В.В.^{1,2}

¹ Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

² Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

В данной работе представлено исследование способа получения газового гидрата, основанного на самоорганизующемся процессе кипения-конденсации гидратообразующего газа в объеме воды. Исследование проводилось на фреоне 134а, когда дно установки нагревалось тепловым потоком $1200 \text{ Вт} / \text{м}^2$. Экспериментальные исследования были выполнены на установке в виде герметичной камеры в форме параллелепипеда с размерами $150 \times 150 \times 740$. Боковые стенки рабочей камеры толщиной 14 мм выполнены из нержавеющей стали. На передней и задней стенках расположены смотровые окна из оргстекла толщиной 24 мм. Давление и температуру фиксировали с помощью датчиков OWEN PD-100 и RT.50 VK1P соответственно. Рабочая зона охлаждалась через боковые стенки за счет циркуляции теплоносителя от термостата LOIP FT-316-40, который имеет диапазон рабочих температур от -40 до $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$. При температуре окружающей среды $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Скорость охлаждения составила 770 Вт . Дно камеры нагревалось с помощью термоэлектрического нагревателя.

В работе изучено влияние уровня воды в рабочей зоне на синтез гидрата газа. Исследования проводились при разных объемах, соответствующих уровню воды 90, 135, 180, 225, 270 мм. Масса газа оставалась постоянной и составляла 250 г. Эксперименты проводились следующим образом. Вода помещается на рабочий участок, который охлаждается через боковые стенки с постоянной температурой $-2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Далее газ закачивается в камеру, охлаждается и конденсируется на стенках установки, стекая вниз. Из-за большей плотности фреона он образует слой жидкости под поверхностью воды на дне рабочей зоны. В результате нагрева дна (1200 Вт/м^2) сжиженный гидратообразующий газ начинает кипеть. Образовавшиеся пузырьки поднимаются вверх в объеме воды, в то же время они попадают в охлаждаемую область (где возможно образование гидрата), в результате чего на их поверхности образуется газогидратная пленка. Поднявшись на поверхность воды, пузырёк лопаётся, оставляя после себя газогидратированную оболочку, выпущенный газ создает дополнительное давление в газовой части рабочей секции. После поднятия определенного количества пузырьков в газовой зоне рабочей зоны создаются условия для конденсации капли газа, которая падает на дно установки, сливаясь с кипящим слоем. Данный процесс является циклическим. Давление практически не изменяется и составляет $0,4 \text{ МПа}$. Оценку массы полученного гидрата проводили следующим образом. После окончания процесса синтеза производится нагрев рабочего

участка, в результате чего синтезированный образец начинает разлагаться на воду и газ. Выделившийся газ создает дополнительное давление в системе. Посредством этого, используя уравнение состояния, оценивается масса газа, абсорбированного в гидрат. Используя эти данные определяется масса синтезированного газогидрата. На рис. 1 показано влияние уровня воды на выход гидрата. Как видно из графика, уровень воды и, соответственно, расстояние подъема пузырьков играют важную роль в этом процессе. Это связано с тем, что начало образования газогидратной оболочки на поверхности пузырька является случайным явлением. Следовательно, увеличение расстояния подъема увеличивает время прохождения пузырька по охлажденной области воды, где возможно образование гидрата, что положительно влияет на массу синтезируемого гидрата. Видно, что 180 мм – это оптимальное расстояние подъема, на котором было синтезировано 220 г газогидрата фреона. Однако дальнейшее увеличение расстояния подъема пузырька негативно сказывается на процесс. Это связано с тем, что при более длительном подъеме образовавшаяся гидратная корка утолщается, замедляя диффузию газа в воду. Кроме того, с увеличением расстояния подъема увеличивается время цикла кипения-конденсации гидратирующего газа в объеме воды, что также замедляет процесс.

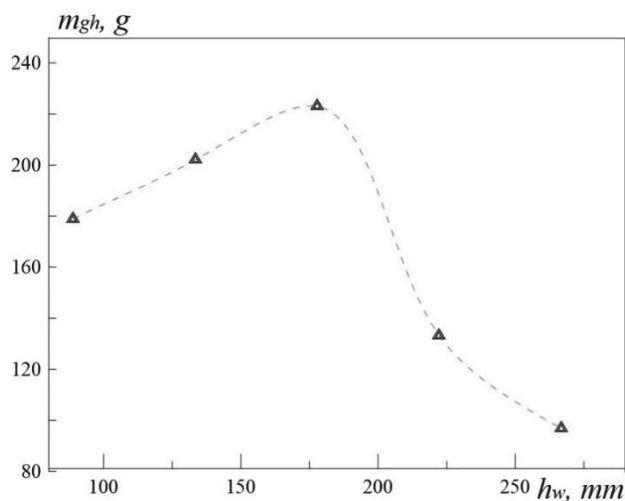


Рис. 1. Влияние уровня воды на синтезируемую газогидратную массу.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00124)

КОНВЕКТИВНЫЙ И ДИФфуЗИОННЫЙ РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ СТЕНКУ

Назаренко Н.Н.¹, Князева А.Г.^{1,2}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
630055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/4

² Томский политехнический университет,
630050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Биологические среды в целом это среды со сложной структурой порового пространства. Наряду с макроскопическими порами имеются многочисленные капилляры. Свойства поверхностей пор и капилляров оказывают влияние на характер течения биологических жидкостей. В общем случае и биологические жидкости обладают специфическими реологическими свойствами и относятся к неньютоновским жидкостям, для описания которых используют различные реологические модели. Широко распространены в литературе модели вязкоупругих, вязкопластических, псевдопластических, дилатантных жидкостей. Все модели с учетом сложной реологии являются нелинейными. Нелинейные эффекты проявляются и при учете зависимости свойств (например, вязкости) от концентрации. Подобные нелинейные явления имеют место в разных задачах теории фильтрации, относящихся к химической технологии, подземной гидродинамике, переносу вещества в живых системах и др. С изучением течений в таких средах связаны работы Баренблатта, Хейфеца, Лыкова и др. Имеется множество публикаций на эту тему и в современных журналах. Однако заметим, что в литературе практически не встречаются работы, в которых фильтрационные течения анализировались бы с учетом явлений концентрационного расширения, бародиффузии и объемной вязкости, в том числе, вызванной физико-химическими превращениями. Эти явления могут быть принципиальными, например, при медленном сжигании природных газов или газовых смесей в пористых реакторах, при медленном течении жидкостей в пористых и трещиноватых грунтах, при течении биологических жидкостей и лекарственных средств через пористые стенки капилляров и т.д., особенно при низких скоростях фильтрации.

В настоящей работе предложена модель процесса переноса биологической жидкости в отдельно выделенной макропоре с микропористыми стенками. Принимаются изотермические условия; уравнения состояния для давления в жидкости записываются в дифференциальной форме [1, 2], что приводит к нелинейной связанной модели.

Течение в макропоре описываем уравнениями Навье-Стокса. Микропористую среду (пористые стенки) моделируем средой Бринкмана. Жидкость считаем несжимаемой.

Уравнения для пористой стенки имеют вид

$$\nabla \cdot V = 0$$

$$\rho \frac{dC_k}{dt} = -\nabla \cdot J_k$$

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\nabla p + \rho g z + \left(\nabla \cdot (\mu \nabla V) - \mu' m \frac{V}{k_f} \right)$$

В простейшем случае поток компонента k удовлетворяет закону Фика

$$J_k = -D_k \rho \nabla C_k$$

и имеет место уравнение состояния

$$dp = 3K \sum_{k=1}^n \alpha_k dC_k,$$

где K - объемный модуль упругости биологической жидкости. Аналогичное уравнение состояния имеет место в объеме макропоры.

В более общем случае учитывается перенос компонента под действием градиента давления. Так, для бинарной смеси последние два соотношения принимают вид

$$dp = K \left(\frac{dp}{\rho} + \alpha_c dC \right)$$

$$J = -D\rho f(C) \nabla C - \frac{DCm}{RT} \alpha_c \nabla p,$$

что позволяет выделить коэффициент переноса под действием градиента давления.

Стационарные задачи для отдельно выделенного капилляра (макропоры) решали численно в безразмерных переменных. Выделены два режима течения: конвективный ($Pe_D > 1$) и диффузионный ($Pe_D < 1$), где Pe_D - диффузионное число Пекле, вычисляемое по параметрам биологической жидкости в объеме макропоры.

Выявлено, в частности, что наибольшее влияние на перераспределение концентрации между объемом капилляра и его пористой стенкой оказывает число Дамкеллера; концентрационное расширение оказывает значительное влияние на характер распределения скорости и концентрации. Обнаруженное неоднозначное влияние параметров модели для разных режимов течения связано со взаимовлиянием противоположных физических механизмов.

Список литературы:

1. Knyazeva A., and Chumakov Yu. Coupling model of filtration with concentration expansion and pressure diffusion // AIP Conference Proceedings. 2018. V. 2051. P. 020125–1–020125–4.
2. Knyazeva A G Pressure diffusion and chemical viscosity in the filtration models with state equation in differential form // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. V. 1128. P. 012036–1–012036–6.

*Работа выполнена в рамках программы
фундаментальных научных исследований РАН
на 2018-2020 годы, проект № 23.2.5.*

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ РАВНОВЕСНЫЙ ВИХРЕВОЙ КЛУБОК В ПРОТИВОТЕКУЩЕМ СВЕРХТЕКУЧЕМ ГЕЛИИ

Немировский С.К.^{1,2}¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1.²Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14.

На основе полученного распределения Гиббса исследовано термодинамическое равновесие в системе хаотических квантованных вихрей в сверхтекучих жидкостях в присутствии противотока нормальной и сверхтекучей компонент. Вычисляется статистическая сумма, в которой учитываются различные конфигурации вихревых нитей, а также распределение петель по длинам. Обсуждаются некоторые физические следствия полученных результатов.

Ранее автором [1] обсуждались вопросы хаотических вихревых нитей или так называемой квантовой турбулентности в сверхтекучих жидкостях и в конденсате Бозе-Эйнштейна (БЭК), возбуждаемой под действием противотока нормальной и сверхтекучей компонент. Одним из обсуждаемых аспектов теории квантовой турбулентности был вопрос о необыкновенной сложности этой проблемы с точки зрения теоретического изучения, и о необходимости какого либо частного подхода к общей задаче. Важным вариантом такого подхода является исследование термодинамического равновесия в системе хаотических квантованных вихрей в сверхтекучем гелии и в БЭК в случае противотока нормальной и сверхтекучей компоненты. Следует подчеркнуть, что эта задача сама по себе также важна и интересна, но что касается турбулентности, имеются основания прояснить многие аспекты структуры и динамики вихревого клубка.

Ранее (см. [1]) нами было показано, что ансамбль вихревых нитей под действием случайной ланжевенской силы в сверхтекучем гелии в присутствии противотока с относительной скоростью $\mathbf{v}_{ns}$ приходит в состояние термодинамического равновесия с распределением Гиббса

$$P(\{\mathbf{s}(\xi)\}, t) = N \exp\left(-\frac{H_c(\{\mathbf{s}\})}{k_B T}\right). \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{s}(\xi, t)$ – радиус-векторы элементов вихревой линии, N – нормировочный множитель. Гамильтониан $H_c\{\mathbf{s}\}$ в присутствии относительной скорости $\mathbf{v}_{ns}$ имеет вид

$$H_c(\{\mathbf{s}\}) = E(\{\mathbf{s}\}) - \mathbf{P}(\mathbf{v}_n - \mathbf{v}_s). \quad (2)$$

Здесь энергия $E(\{\mathbf{s}\})$ и импульс Лэмба $\mathbf{P}(\{\mathbf{s}\})$ определены как (см., например, [2])

$$E(\{\mathbf{s}\}) = \frac{\rho_s \kappa^2}{8\pi} \int_{\Gamma} \int_{\Gamma} \frac{\mathbf{s}'(\xi) \mathbf{s}'(\xi')}{|\mathbf{s}(\xi) - \mathbf{s}(\xi')|} d\xi d\xi', \quad (3)$$

$$\mathbf{P}(\{\mathbf{s}\}) = \frac{\rho_s \kappa}{2} \int \mathbf{s}(\xi) \times \mathbf{s}'(\xi) d\xi. \quad (4)$$

Соотношения (1) – (4) должны быть использованы для вычисления статистической суммы, и, соответственно, для определения различных свойств вихревого клубка. Статистическая сумма выражается в виде континуального интеграла от конфигураций вихревых петель $\{\mathbf{s}(\xi)\}$

$$Z(T, \mathbf{v}_{ns}) = \int D\{\mathbf{s}_j(\xi)\} \sum \exp\left(-\frac{H\{\mathbf{s}\}}{k_B T}\right). \quad (5)$$

В одном важном случае, так называемого локального приближения, энергия может быть выражена в виде $E = \varepsilon_V l$ (здесь ε_V – энергия единицы длины). В этом случае континуальный интеграл в статистической сумме (5) становится Гауссовым, и статистическая сумма может быть вычислена точно. С использованием полученной статистической суммы можно вычислить структурные факторы квантовой турбулентности, например среднюю поляризацию вихревых петель, входящих в состав вихревого клубка в противотоке гелия II, а также анизотропию и среднюю кривизну. Эти величины были ранее получены только в численной работе Шварца [3]. Представляет интерес сравнить результаты по равновесным свойствам вихревого клубка, которые могут быть получены на основании развитого здесь формализма, с данными по квантовой турбулентности.

Список литературы:

1. Nemirovskii, S. K. Thermal Equilibrium of Vortex Lines in Counterflowing He II // Journal of Low Temperature Physics. 2016. V. 185. P. № 5–6. 365–370.
2. Nemirovskii S. K., Quantum turbulence: Theoretical and numerical problems // Phys. Rep. 2013. V.524, P. 85–202.
3. Schwarz, K. W., Three-dimensional vortex dynamics in superfluid He₄: Homogeneous superfluid turbulence // Phys. Rev. B. 1988. V. 38. № 4. P. 2398–2417.

Работа поддержана РНФ (грант № 19-19-00321)

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ТЕПЛООБМЕНА В КАПЛЕ ЖИДКОСТИ ПРИ ЕЁ ПАДЕНИИ НА НАГРЕВАЕМУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Пономаренко Т.Г.^{1,2}, Чеверда В.В.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, Пирогова, 1

Капли жидкости, движущиеся по твёрдой поверхности, широко распространены в природе, используются во многих областях техники и перспективны в новых высокоинтенсивных теплообменниках.

Капля также является самым простым и удобным объектом для изучения процессов смачивания, растекания, теплопереноса и свойств трехфазной контактной линии «газ – жидкость – твёрдое тело». Недостаточно полная изученность этих явлений и свойств в настоящее время сдерживает разработку как математических моделей испарения капель жидкости на твёрдых поверхностях, так и практические работы по созданию эффективных и компактных спрейных систем охлаждения, а также других новых приложений в энергетике, медицине, в химической, фармацевтической и пищевой промышленности.

Падение капель на твердую поверхность связано с многими факторами: поверхностным натяжением, смачиваемостью, геометрией и свойствами материала рабочей поверхности и т.д. [1, 2].

Для изучения гидродинамики, изменения формы капли при падении на твёрдую поверхность, теплообмена при её испарении и процессов в трёхфазной контактной линии создана экспериментальная установка (см. рис. 1).

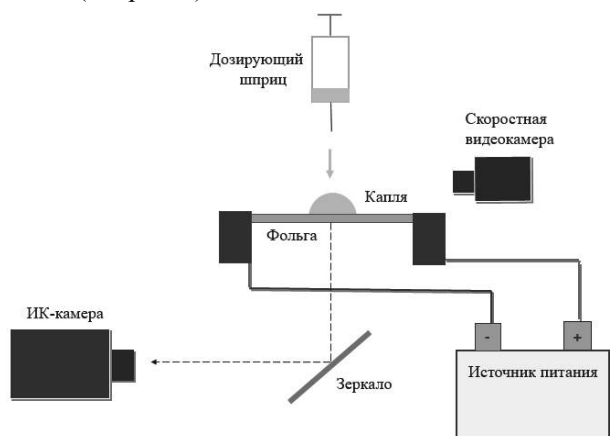


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Рабочий участок представляет собой фольгу из константана толщиной 25 мкм, подключенную к источнику питания ТТi QPX 1200L, с помощью которого осуществляется её нагрев. Капля на фольгу пози-

ционируется с помощью высокоточного дозирующего шприца. В качестве жидкости используется вода. Однако планируется проведение экспериментов с разными жидкостями.

Инфракрасная камера Titanium 570M используется для измерения температуры поверхности фольги с помощью металлического зеркала. Для наблюдения за падением капли сверху используется высокоскоростная камера FastVideo 500M.

В настоящем исследовании данные инфракрасной термографии используются для вычисления плотности теплового потока в области динамической контактной линии капли. С помощью инфракрасной камеры были получены распределения температуры на нижней стороне фольги и фотографии капли с камеры для разных моментов времени при падении её на нагреваемую поверхность.

Для того чтобы оценить интенсивность теплообмена при испарении жидкости вблизи контактной линии используется численный метод решения некорректной задачи – нестационарного уравнения теплопроводности с данными на временноподобной поверхности. Распределение температуры для решения данного уравнения получены в ходе эксперимента с помощью инфракрасной термографии с несмоченной поверхности и использованы для решения некорректной задачи. Данный метод используется поскольку прямое измерение плотности теплового потока в этой области на данный момент не может быть осуществлено в связи с малым поперечным размером этого региона [3].

Список литературы:

1. Pautsch A.G., Shedd T.A. Adiabatic and diabatic measurements of the liquid film thickness during spray cooling with FC-72// International Journal of Heat and Mass Transfer. 2006. V. 49. P. 2610–2618.
2. Roisman I. V., Gambaryan-Roisman T., Kyriopoulos O., Stephan P. and Tropea C. Breakup and atomization of a stretching crown// Physical Review E. 2007. V. 76 (2). P. 26302–1–26302–9.
3. Marchuk I., Karchevsky A., Surtaev A., and Kabov O. Heat flux at the surface of foil heater under evaporating sessile droplets// Int. J. Aerospace Engineering. 2015. V. 2015. P. 1–5.

Работа выполнена при поддержке проекта
РНФ № 18-19-00538

РАННЯЯ СТАДИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАПЛИ С УДАРНОЙ ВОЛНОЙ: ОБТЕКАНИЕ, ДЕФОРМАЦИЯ, РАЗРУШЕНИЕ

Поплавский С.В.¹, Минаков А.В.², Шебелева А.А.²

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

² Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, Россия

Поведение капель в потоке за проходящей ударной волной (УВ) это одна из важных задач аэродинамического диспергирования жидкостей. В техногенных системах взаимодействие капель с УВ реализуется вблизи деталей планера и на лопатках турбин сверхзвуковых летательных аппаратов, в задачах горения и взрыва аэрозолей углеводородных топлив применительно к промышленной взрывобезопасности и к перспективным детонационным двигателям. Данная работа посвящена экспериментальным и расчетным исследованиям поведения капель воды на ранней стадии пребывания в потоке за УВ, верификации расчетов на этой основе и получении новых данных о процессе, недоступных в эксперименте.

Из опытов использовалась высокоскоростная теневая визуализация процесса на основе лазерного стробоскопа, а также газодинамические параметры течения при числах Маха УВ $Ms=1.11-1.34$ в диапазоне чисел Вебера $We=200-2200$ [1]. В расчетах моделировались условия этих опытов, используется VOF метод для разрешения межфазной границы, LES модель для описания турбулентности и технология адаптированных динамических сеток [2]. Важный результат расчетов это хорошее совпадение формы капли с экспериментами в одинаковые моменты пребывания за УВ на всех режимах (Рис.1).

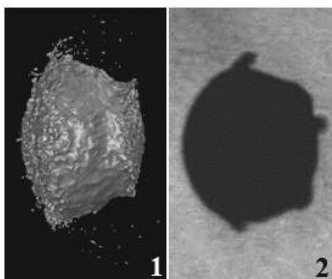


Рис. 1. Сравнение расчета (1) с экспериментом (2) по форме капли в момент начала массоуноса при, $We=650$.

Количественные характеристики процесса, такие как период индукции разрушения и темп деформации также показали хорошее согласие с экспериментами. Известно, что форма капли, подобная Рис.1, характерна для всего исследованного диапазона чисел We , но механизм такого рода деформации до сих пор не изучен. В данной работе рассмотрен вопрос о связи формы капли и картины ее обтекания как отклик жидкой сферы на изменение поля скорости вблизи нее. Выполнено численное моделирование обтекания капли на разных стадиях эволюции ее формы (Рис.2). Сравнение расчетов с данными PIV, полученными в экспериментах на модели капли в стационарном потоке [1], показало следующие особенности обтекания капли. При слабой деформации капли ее обтекание близко к картине обтекания сферы при числах Рейнольдса $Re \sim 10000$ с отрывом вблизи миделя (1). За-

тем формируется тороидальный вихрь (2) и возвратное течение (3) одновременно с ростом двух кольцевых волн (4) и (5) на изначально сферической капле.

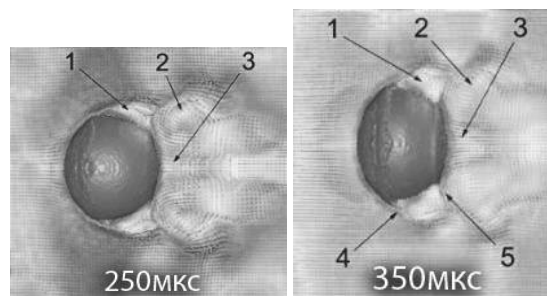


Рис. 2. Поле течения вблизи и в следе капли в различные моменты времени, число $We=208$.

Волна (4) зарождается еще при сферической форме капли в области отрыва потока, где его скорость максимальна, а давление минимально. Вторая постоянная структура представляет собой зону рециркуляции с интенсивным противотоком вдоль оси следа (3). Распределение давления на донной части капли от этого потока делает поверхность плоской, а на ее границе возникает отрыв радиального донного течения. Здесь формируется вторая волна (5), связанная с радиальным растеканием жидкости в сопряженном погранслое на донной поверхности. Радиальный поток газа разделяется вблизи волны (5), часть его проникает в первую отрывную зону (1), а остальной поток попадает в третью постоянную структуру (2). Структура (2) частично разделяет две первые и представляет собой изолированный тороидальный вихрь, не взаимодействующий с поверхностью капли. Сравнение теневых снимков капли в момент начала разрушения с полем внешнего течения показало, что массоунос происходит в вершинах волн, а они формируются в точках отрыва потока.

Результаты моделирования поля течения вблизи деформируемой капли хорошо согласуются с данными PIV для модели капли и дают основу для построения феноменологической картины поведения капли в потоке за УВ.

Список литературы:

1. Бойко В.М., Поплавский С.В. Экспериментальное исследование двух типов срывного разрушения капли в потоке за ударной волной // ФГВ. 2012. Т. 48. № 4. С. 76–82.
2. Minakov A.V. Numerical algorithm for moving boundary fluid dynamics problems and its testing // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2014. Vol. 54. No. 10. P. 1560–1570.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект АААА-А17-117030610137-0) и за счет средств РФФИ (проект № 18-38-00565)

**МОДЕЛЬ МОБИЛЬНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СНАРЯДНОГО ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА****Сажин И.А., Шумейко В.А.**Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Экспериментальные исследования являются основой для идентификации режимов течения двухфазных сред [1]. Оптические методы исследований получили широкое распространение для изучения газожидкостных систем. В работе [2] реализованы оригинальные методики исследования трехмерной структуры первичных и вторичных волн пленки жидкости (ЛИФ-метод, ПЛИФ-метод), достоверно определены механизмы уноса капель жидкой фазы в газовое ядро и захват газовых пузырей пленкой жидкости.

Изучены течения в каналах круглого и прямоугольного сечения в опускном, восходящем, горизонтальном потоках. Показано, что зависимость волновых характеристик от расходов фаз в случае больших скоростей газа качественно одинакова. Достоверность результатов этого исследования можно назвать абсолютной. Но его применение ограничено стенами лаборатории. Обобщение большого числа экспериментальных исследований показывает наличие зависимости между целесообразностью каждого метода и поставленными задачами.

На практике востребованы мобильные экспериментальные установки, позволяющие здесь и сейчас определить параметры многофазной среды. В данной статье рассмотрена работа экспериментальной установки для наблюдения, измерения параметров газожидкостного потока, в том числе при смене режимов течения. В процессе работы варьировались газосодержание и давление потока. Рассмотрены переходные процессы в восходящем газожидкостном потоке с применением аппаратной регистрации.

Экспериментальная установка с замкнутым циклом движения жидкости состоит из вертикальной стеклянной трубки, дозаторов жидкой фазы, установленные в нижней части стеклянной трубки, накопительного резервуара, компрессора, амперметра, с помощью которого регистрируется сила тока в электродвигателе компрессора, вспомогательная арматура

[3]. Измерительная часть установки существенно изменена по сравнению с [3].

Выполнена тарировка фоторезисторов (фоточувствительные элементы), т.к. их параметры отличаются друг от друга, даже из одной партии производителя. Фотопара в установке была изолирована от внешней засветки, а интенсивность света источника подобрана экспериментально в соответствии с возможностями осциллографа. Параметры резистора, гасящего помехи, подобраны экспериментально, учтено их влияние на амплитуду сигнала. Измерения проведены при максимальной силе тока к источнику света, в данном случае светодиода индикаторного типа (LED). Питание светодиода осуществлялось через ШИМ – контроллер (PWM), для точной регулировки силы света.

Представлены результаты исследований зависимости варьируемых параметров и режимов течения двухфазного потока жидкость – газ, проведен анализ изменения теплофизических параметров смеси в процессах перехода от одного режима течения к другому. Полученные результаты соответствуют известным данным [1]. Представляется целесообразным дальнейшее усовершенствование представленной экспериментальной установки для определения параметров снарядного режима течения двухфазных сред.

Список литературы:

1. Исследование турбулентных течений двухфазных сред/ Накоряков В.Е. и др. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР. 1973. 315 с.
2. Alekseenko, S.V., Antipin, V.A., Cherdantsev, A.V., Kharlamov, S.M., Markovich, D.M. Two-wave structure of liquid film and waves interrelation in annular gas – liquid flow with and without entrainment. *Phys. Fluids*. 21:061701–061704.
3. Гужов В.И., Сажин И.А., Шумейко В.А. Фотофиксация и регулирование переходных параметров газожидкостного потока. *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. 2018. №1(70). С. 67–78.

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КАПЕЛЬНОГО УНОСА БОРНОЙ КИСЛОТЫ ПРИ АВАРИЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ РЕАКТОРА ВВЭР

Сахипгареев А.Р., Морозов А.В., Рагулин С.В.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»,
249033, Россия, Обнинск, пл. Бондаренко, 1

Обеспечение безопасности современных проектов АЭС с целью предотвращения аварий, которые могут оказать отрицательное экологическое влияние на окружающую среду, является одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед современной атомной энергетикой. В рамках реализации проекта «ВВЭР-ТОИ» особое внимание уделяется обеспечению безопасности реактора при запроектных авариях с разрывом главного циркуляционного контура (ГЦК) и потерей всех источников переменного тока в течение 72 ч. Эта задача решается за счет функционирования пассивных систем безопасности, которые обеспечивают охлаждение активной зоны за счет последовательной подачи в реактор раствора борной кислоты с концентрацией 16 г/кг из систем гидроёмкостей первой, второй и третьей ступеней.

Как известно [1], активная зона в это время находится в состоянии кипения. Вследствие выпаривания теплоносителя и притока большого количества борированного раствора, возможно увеличение количества борной кислоты в активной зоне. В результате чего, могут быть достигнуты условия её кристаллизации и дальнейшего осаждения в нижней части реакторной установки (см. рис. 1). Это в свою очередь может привести к затруднению движения охлаждающей жидкости на наружной поверхности твэлов, тем самым ухудшая теплоотвод.

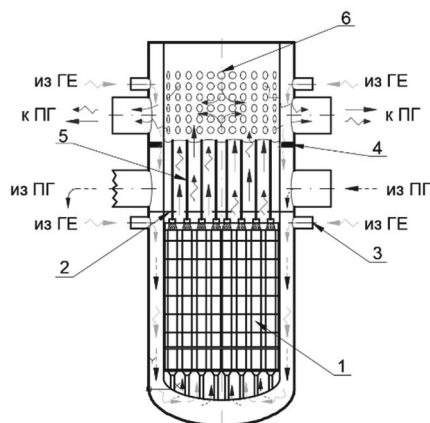


Рис. 1. Массоперенос борной кислоты в РУ ВВЭР при авариях с разрывом ГЦК. 1 – активная зона, 2 – уровень теплоносителя, 3 – патрубок системы аварийного охлаждения зоны, 4 – разделительный бурт, 5 – блок защитных труб, 6 – перфорация шахты реактора — — — — — поток пара, ~~~~~ — поток капель, - - - - - поток конденсата, - · - · - — поступление раствора борной кислоты из систем гидроёмкостей.

Таким образом, поступление дополнительного объема борной кислоты в активную зону приведёт к превышению её предела растворимости. В свою очередь, вынос борной кислоты из реакторной установки

с паром или вследствие капельного уноса может существенно снизить риск ее кристаллизации.

Следовательно, исследование данных процессов выноса борной кислоты из активной зоны имеет важное прикладное значение для расчетов аварийных режимов на АЭС с ВВЭР нового поколения, оснащёнными пассивными системами безопасности.

В литературе имеется ряд работ по исследованию растворимости борной кислоты в насыщенном водяном паре. Однако, имеющиеся в них результаты не охватывают весь диапазон параметров (температура, давление, концентрация кислоты), характерных для возможной аварийной ситуации на АЭС с ВВЭР. В связи с чем, в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» были проведены экспериментальные исследования растворимости борной кислоты в паре, в широком диапазоне концентраций и при различном давлении [2]. Была получена зависимость изменения коэффициента распределения борной кислоты между фазами от её концентрации в модели активной зоны.

Для определения величины капельного уноса борной кислоты в условиях аварийной ситуации было проведено расчетное моделирование процессов массопереноса в реакторе ВВЭР и определена скорость витания. Под скоростью витания понимают относительную скорость капли, при которой силы трения уравновешивают вес капли [3]. Результаты расчетной оценки позволили определить размер капель, которые могут быть вынесены из активной зоны вместе с потоком пароводяной смеси в парогенератор. Получена зависимость приведенной скорости пара и скоростей витания от величины остаточного энерговыделения и диаметра капель. Установлено, что на процессы капельного уноса большое влияние оказывает величина поверхностного натяжения борной кислоты.

Для снижения консервативности выполненной расчётной оценки, в дальнейшем, необходимо проведение экспериментального измерения величины поверхностного натяжения раствора H_3BO_3 при параметрах характерных для аварийной ситуации ВВЭР.

Список литературы:

1. Калякин С.Г., Сорокин А.П., Пивоваров В.А., Пометько Р.С., Селиванов Ю.Ф., Морозов А.В., Ремизов О.В. Экспериментальные исследования теплофизических процессов в обоснование безопасности ВВЭР нового поколения // Атомная энергия. 2014. Т. 116. Вып. 4. С. 241–246.
2. Морозов А.В., Питык А.В., Сахипгареев А.Р., Шлепкин А.С. Экспериментальное исследование растворимости борной кислоты в паре при кипении // Journal of Physics: Conf. Series 1105, 2018, 012056.
3. Кутепов А.В., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. «Гидродинамика и теплообмен при парообразовании: Учеб. Пособие для втузов» // М.: Высшая школа, 1986. 448 с.: ил.

Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда (проект №16-19-10649)

**ИЗУЧЕНИЕ САМОКОНСЕРВАЦИИ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ
В СУСПЕНЗИЯХ В НЕФТЯХ****Скиба С.С.^{1,2}, Манаков А.Ю.^{1,2}**¹ Институт Неорганической Химии им. А.В. Николаева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 3² Новосибирский Государственный Университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Газовые гидраты – класс соединений включения в которых молекулы веществ, при нормальных условиях являющимися газами, находятся в полостях каркаса построенного из молекул воды. Как правило для существования газовых гидратов требуются высокие давления и/или низкие температуры [1].

В настоящее время одной из причин интереса к газовым гидратам является их образование в нефтяных и газовых трубопроводах, что приводит к блокировке потока. Впервые о блокировке трубопровода газовыми гидратами было рассказано в 1934 году в работе Хаммершмидта [2]. С течением времени риск закупоривания трубопроводом увеличивается и будет увеличиваться в дальнейшем в связи с тем, что условия нахождения нефтяных месторождений смещаются в сторону более высоких давлений (более глубоководные месторождения) и более низких температур (освоение северных территорий).

В промышленности для борьбы с образованием гидратных пробок обычно используют так называемые термодинамические ингибиторы, которые смещают условия гидратообразования в сторону более высоких давлений и более низких температур. Также относительно недавно стали использоваться низкодозируемые химикаты: кинетические ингибиторы, замедляющие скорость нуклеации или рост гидратов и антиагломеранты, препятствующие слипанию частиц гидратов [3].

В последнее время изучается возможность «управления гидратообразованием». Эта концепция включает в себя возможность образования гидратов в трубопроводах таким образом, чтобы они транспортировались вниз по течению в форме дисперсии без закупоривания трубопроводов [3].

Несмотря на все успехи в плане предотвращения образования гидратных пробок в трубопроводах они образуются, что приводит к дополнительным затратам со стороны компаний-операторов связанных с необходимостью разложения этих пробок и связанных со временем простоя на производстве [4].

Самоконсервация гидратов – это кинетический эффект связанный с тем, что на поверхности гидрата образуется корка льда, препятствующая дальнейшему разложению гидрата, затрудняя процесс массопереноса молекул газа от гидрата наружу. Самоконсервация гидратов может существенно замедлять разложение гидратов вплоть до полного прекращения этого процесса [5]. Этот эффект становится более выраженным при увеличении размера разлагаемого гидрата.

Недавно была показана, возможность самоконсервации малых частиц гидратов в нефтяных суспензиях [6].

Таким образом в процессе разложения гидратных пробок, образовавшихся в трубопроводах скорость разложения этих гидратных пробок может очень сильно замедляться из-за явления самоконсервации гидратов. Особенно это актуально для северных регионов России, где отрицательные температуры наблюдаются большую часть года. Необходимо понимать процессы, происходящие при самоконсервации малых частиц гидратов в нефтях для дальнейшего возможного управления этим процессом.

Было проведено несколько серий экспериментов по разложению суспензий гидратов в различных нефтях при температуре -10°C .

Эксперименты были проведены с образцами нефти Казанского месторождения, образцами этой нефти после 30 суток биодеградации, образцами нефти Усть-Тегусского месторождения и с образцами модельной системы.

Было показано, что явление самоконсервации гидратов зависит:

1. От химического состава компонентов нефти, так в экспериментах с использованием некоторых нефтей явление самоконсервации не наблюдалось и процесс разложения гидратов происходил быстро (в течение 2 дней), в некоторых экспериментах процесс разложения гидратов происходил медленно (более 10 дней), что говорило о том, что происходит самоконсервация гидратов.

2. От перемешивания суспензии. В предыдущих работах было показано, что в статических условиях самоконсервация наблюдалась во всех экспериментах, однако в этой работе при перемешивании в некоторых случаях самоконсервации не наблюдалось.

3. От предыстории образца. Было показано, что после нескольких циклов гидратообразования – разложение самоконсервация гидратов исчезала и процесс разложения гидратов происходил быстро.

Список литературы:

1. Clathrate hydrates of natural gases / E.D. Sloan, C.A. Koh; CRC Press, 2007. 752 с.
2. Hammersmith E. Formation of gas hydrates in natural gas transmission lines// Ind. Eng.Chem. 1934. Т. 26. №8. С. 851–855.
3. Natural gas hydrates in flow assurance / E.D. Sloan, C.A. Koh и др.; Elsevier Inc, 2010. 224 с.
4. Hydrate engineering / D. Sloan; Society of Petroleum Engineers, 2000. 89 с.
5. Истомин В.А. и др. Эффект самоконсервации газовых гидратов// Газовая промышленность, спецвыпуск «Газовые Гидраты». 2006. С. 16–27.
6. Stoporev A.S. и др. Unusual self-preservation of methane hydrate in oil suspensions // Energy and Fuels. 2014. Т.28. № 2. С. 794–802.

Работа была проведена при поддержке гранта РНФ 17-17-01085 «Кинетика образования и диссоциации газовых гидратов в нефтяных средах»

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С НЕФТЕНАСЫЩЕННЫМИ ДИСПЕРСНЫМИ СИСТЕМАМИ

Султангужин Р.Ф., Зиннатуллин Р.Р., Ковалева Л.А.

Башкирский государственный университет,
450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

Истощение традиционных нефтяных месторождений является острым вопросом, вынуждающим к разработке месторождений трудноизвлекаемой нефти, которые характеризуются сложным геологическим строением, низкой проницаемостью, высокой вязкостью и сложной реологией нефти. Эффективная разработка таких месторождений не может быть обеспечена существующими технологиями. Необходимы новые инновационные технологии, которые повысят эффективность разработки месторождений трудноизвлекаемой нефти и сделают ее экономически целесообразной.

В данной работе описывается экспериментальный стенд по исследованию процессов взаимодействия электромагнитных полей с нефтенасыщенными пористыми средами. Определены диэлектрические параметры объектов воздействия. Приведены результаты экспериментальных исследований нагрева модели нефтенасыщенной породы при воздействии высокочастотного электромагнитного поля.

Метод нагрева призабойной зоны пласта с использованием энергии электромагнитного поля представляется наиболее эффективным и перспективным [1, 2, 3]. Основная цель использования электромагнитного поля – нагрев пласта для снижения вязкости нефти. Высоковязкие и сверхвязкие нефти в отношении электромагнитных процессов представляют собой слабопроводящий, немагнитный, полярный диэлектрик. Зависимость диэлектрических параметров от термогидродинамического состояния среды от частоты поля устанавливается обычно экспериментально, путем измерения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в зависимости от температуры, давления и частоты ВЧ ЭМ поля. Эти особенности были учтены при выборе рабочей частоты генератора ЭМ излучения.

Температура среды повышается за счет трения осциллирующих в переменном электромагнитном поле молекул с дипольными моментами. Для электромагнитного нагрева пласта можно использовать широкий спектр частот от 300 кГц до 300 МГц. Оптимальная частота воздействия должна выбираться для каждого месторождения на основе результатов исследования физико-химических свойств пласта и насыщающей его углеводородной жидкости. От правильности выбора частоты излучения зависит степень взаимодействия электромагнитной волны с нефтью, а также глубина проникновения ее в пористую среду. Кроме этого преимущество метода состоит не только в тепловом воздействии, но в проявлении дополнительных эффектов, связанных с особенностями физико-химических явлений в многокомпонентных углеводородных системах при воздействии высокочастотного электромагнитного поля [4].

Исследования проведены на специально разработанном стенде (см. рис. 1), состоящем из модели призабойной зоны пласта и высокочастотного импульсного генератора, спускаемого в скважину на уровень продуктивного пласта.

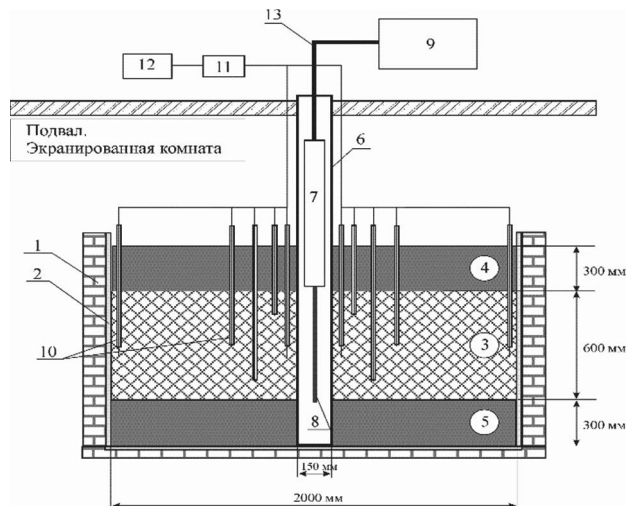


Рис. 1. Схема модели для исследования процессов взаимодействия электромагнитных полей с нефтенасыщенными пористыми средами:

1 – вертикальный цилиндрический бетонокирпичный кожух; 2 – термоизоляционный материал; 3 – пласт; 4 – кровля; 5 – подошва; 6 – скважина; 7 – генератор; 8 – электромагнитный излучатель; 9 – блок питания; 10 – система термодатчиков; 11 – регистратор многоканальный; 12 – ПК; 13 – радиочастотный кабель.

Модель продуктивного пласта представляет собой слой кварцевого песчаника. Распределение температуры в пласте при высокочастотном электромагнитном воздействии регистрируется системой контроля температуры.

Результаты исследований представлены в виде кривых распределения температуры в модели пласта при высокочастотном электромагнитном нагреве.

Список литературы:

1. Rassenfoss S. Seeking More Oil, Fewer Emission // Journal of Petroleum Technology. – 2012. – No.9. – P.34–45.
2. Способ разработки залежи высоковязкой нефти. Ковалева Л.А., Давлетбаев А.Я., Зиннатуллин Р.Р. // Патент на изобретение RU №2454532. – Оpubл. 27.06.12.
3. Ковалева Л.А., Миннигалимов Р.З., Зиннатуллин Р.Р. Развитие электромагнитной технологии для утилизации нефтяных шламов // Нефтяное хозяйство. – 2009. – №9. – С.48–51.
4. Саяхов Ф.Л., Ковалева Л.А., Насыров Н.М., Галимбеков А.Д. Влияние высокочастотного электромагнитного поля на перекрестные эффекты переноса в многокомпонентных системах // Магнитная гидродинамика. – 1998. – Т.34, №2. – С.148–157

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-11-00298)

**КАВИТАЦИОННОЕ ОБТЕКАНИЕ ТАНДЕМА ДВУМЕРНЫХ ГИДРОКРЫЛЬЕВ:
ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И PIV ИЗМЕРЕНИЯ****Тимошевский М.В.^{1,2}, Ничик М.Ю.^{1,2}, Первунин К.С.^{1,2}**¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Кавитация является одним из наиболее распространенных и опасных источников нестационарностей течения в гидравлическом оборудовании. Хорошо известно, что нестационарности значительно усиливают пульсации давления и скорости в потоке, что сопровождается также ростом уровня шума и вибрационных нагрузок на несущие конструкции и подвижные части гидравлического оборудования. В конечном счете, это приводит к их повреждению, усталостным разрушениям и, как следствие, снижению эффективности системы в целом. В случае, когда два различных типа неустойчивостей развиваются одновременно, их согласование может приводить к резонансным явлениям, оказывающим разрушительное воздействие на гидравлическую систему. Более глубокое понимание механики нестационарного взаимодействия кавитационных каверн с турбулентными следами и интенсивными вихрями крайне важно для совершенствования современной гидравлической техники. Более того, в настоящее время развивающиеся численные методы математического моделирования двухфазных течений при больших числах Рейнольдса в крупномасштабных промышленных установках все еще не способны с приемлемой точностью описывать эволюцию потока в условиях взаимного влияния различных процессов. Кроме того, в литературе отсутствуют подробные экспериментальные данные по данной проблематике, что дополнительно усложняет валидацию численных моделей. Настоящее исследование направлено на экспериментальное изучение кавитационного обтекания тандема гидрокрыльев.

Эксперименты были проведены на кавитационном стенде в Институте теплофизики СО РАН. В качестве объекта исследования был взят тандем из двух двумерных гидрокрыльев. Первое из них (расположенное выше по течению) представляло собой профиль NASA0012 с исходной длиной хорды 120 мм, задняя часть которого была усечена на расстоянии 100 мм от передней кромки и закруглена с радиусом 3 мм, так что максимальная толщина крыла составляла 14,4 мм и достигалась на расстоянии 36 мм от передней кромки, а конечная длина хорды была равна 100 мм. Второе гидрокрыло было изготовлено по форме NASA0022–34 с длиной хорды 100 мм и тупой задней кромкой высотой 0,44 мм, причем максимальная толщина профиля составляла 22 мм на расстоянии 40 мм от передней кромки. Расстояние между профилями (от задней до передней кромки) составляло 40 мм. Такая конфигурация объекта исследования представляет собой упрощенную и линеаризованную модель системы статорная колонна (СК) – направляющая лопатка (НЛ) радиально-осевой турбины. Исследование было выполнено при вариации угла атаки переднего крыла (модель СК) α_1 от 0 до 9 градусов. Для каждого значе-

ния α_1 также изменялся угол атаки заднего крыла (модель НЛ) α_2 от 0 до 15 градусов. Для достижения различных режимов кавитационного обтекания варьировалось число кавитации σ . В случае тандема число кавитации σ_T определялось аналогичным образом, как и для одиночного гидрокрыла. Для анализа динамики и пространственной структуры кавитационных каверн и оценки их интегральных параметров была проведена высокоскоростная визуализация течения с частотой съемки 20 кГц с использованием трех камер Photron FASTCAM SA5, которые производили регистрацию синхронно. На нестационарных режимах течения с помощью гидрофона записывался гидроакустический сигнал пульсаций давления в следе за тандемом с частотой дискретизации 5 кГц, что позволило провести сравнение спектров мощности пульсаций давления для различных условий. Скорость потока со стороны разряжения гидрокрыльев и в следе за ними измерялась методом PIV. В результате набора ансамбля из 5000 полей мгновенной скорости для каждого режима были рассчитаны средние и турбулентные характеристики течений.

В работе рассмотрено влияние турбулентного следа СК на динамику кавитации на НЛ. Показано, что структура каверны на одиночной НЛ и в тандеме существенно различаются. В случае тандема кавитационные пузыри, возникающие при малых углах атаки, оказываются деформированными и представляют собой изолированные кавитационные пятна. При нестационарных режимах и больших углах атаки над НЛ в тандеме возникают тонкие продольно ориентированные кавитирующие вихри. Режимы облачной кавитации для НЛ в тандеме отсутствуют при малых и умеренных углах атаки ($<15^\circ$), вместо этого кавитационный скачок определяет динамику течения. Когда углы атаки моделей СК и НЛ близки, неустойчивость каверны на НЛ может быть вызвана пульсациями каверны на СК, в таком случае автоколебания каверн на обоих гидрокрыльях происходят синхронно. В целом развитие кавитации на НЛ в тандеме значительно затягивается по сравнению с одиночной НЛ в виду того, что турбулентный след СК возмущает течение над НЛ, что в свою очередь является неблагоприятным фактором для формирования присоединенной каверны. Чем больше угол атаки, тем этот эффект более выражен. При умеренных углах атаки и стационарных условиях течения принудительная турбулизация потока сдвигает точку отрыва пограничного слоя на НЛ в тандеме к задней кромке и уменьшает интенсивность турбулентных пульсаций в следе.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке
Российского научного фонда (проект №19-79-30075)*

РАЗРАБОТКА ГЕОМЕТРИИ ПРОФИЛЯ СОПЛОВОЙ ЛОПАТКИ С ПОВЫШЕННОЙ СЕПАРАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТЬЮ ДЛЯ ВЛАЖНО-ПАРОВЫХ СТУПЕНЕЙ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Тищенко А.А., Алексеев Р.А., Тищенко В.А., Гаврилов И.Ю., Попов В.В., Грибин В.Г.

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»,
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14

Проблема повышения эффективности и надежности работы конденсационных паровых турбин напрямую связана с особенностями работы отсеков ЦНД, в которых происходит течение двухфазной среды, включающей в себя паровой поток и дискретную жидкую фазу, проявляющуюся в виде пленок на поверхностях межлопаточных каналов и полидисперсных потоков капель. Это существенно влияет на условия работы последних ступеней паровых турбин, так как жидкая фаза участвует как в термодинамических, так и в механических процессах, протекающих в проточных частях турбомашин. Одним из наиболее актуальных вопросов, связанных с повышением надежности работы влажно-паровых турбин, является эрозионный износ поверхностей рабочих лопаток, вызванный соударением крупных эрозионно опасных капель со стенками межлопаточных каналов. Применение активных систем борьбы с подобной влагой (удаление водяной пленки с поверхности статорных элементов турбины) позволяет снизить интенсивность подобных процессов, однако, их эффективность может быть значительно повышена при условии использования подробных данных о характере движения и формирования крупных капель в проточных частях ЦНД.

В работе [1] было экспериментально подтверждено, что структура потоков крупных капель в межлопаточных каналах является крайне сложной ввиду особенностей взаимодействия частиц жидкой фазы с поверхностями лопаточных аппаратов. Полученные данные позволили установить два важных фактора в формировании эрозионно опасной влаги: наиболее активное формирование водяной пленки происходит вблизи выходной кромки лопатки в местах, где ее невозможно удалить с помощью системы сепарации; вблизи поверхностей лопаток образуется «парокапельный» слой из частиц жидкой фазы, которые не контактируют с ними и, соответственно, не могут быть удалены из проточной части. Проявление данных особенностей напрямую связано с процессами взаимодействия частиц жидкой фазы с поверхностями межлопаточных каналов и определяется особенностями геометрии лопаточного аппарата.

Задачей настоящего исследования является разработка геометрии профиля сопловой лопатки, обладающей повышенными сепарационными способностями. Выработка формы лопатки осуществляется с помощью методики профилирования, описанной в [2]. Основным требованием при создании геометрии являлось снижение энергии соударения капель с поверхностью лопатки. Таким образом, обеспечивалось уменьшение интенсивности образования вторичных капель после взаимодействия с твердой стенкой. Это

позволяет увеличить расход в жидкой пленке, которая может быть удалена из проточной части с помощью системы сепарации. При этом уменьшается интенсивность потоков крупных капель, покидающих поверхность. Кроме того, за счет оптимизации геометрии профиля необходимо направить формируемые потоки частиц жидкой фазы таким образом, чтобы область с максимальным ростом расхода в пленке была удалена от выходной кромки лопатки и захватывалась сепарационной щелью.

Рассмотрено несколько модифицированных геометрий лопатки. В первую очередь уделялось внимание форме входной кромки и вогнутой поверхности профиля. Основной идеей является увеличение угла соударения капель между направлением их движения и нормалью к стенке межлопаточного канала. При этом учитывалось влияние изменения формы профиля на аэродинамическую эффективность решетки. Для каждого из разработанных вариантов геометрии проведены численные исследования движения и формирования крупных эрозионно опасных капель. По результатам расчета был выбран наиболее оптимальный вариант с точки зрения обеспечения высокой сепарационной способности геометрии.

Для выбранной формы профиля были проведены экспериментальные исследования движения влажно-парового потока внутри межлопаточного канала. Для определения характеристик капель использовался метод лазерной диагностики потоков PTV. Проведено сравнение экспериментальных данных для новой геометрии с исходным профилем. Полученные данные подтвердили правильность выбранного подхода – удалось снизить толщину «парокапельного» слоя, сместить область активного формирования пленки дальше от выходной кромки.

Также в рамках экспериментального исследования были изучены аэродинамические характеристики разработанной геометрии и проведено их сравнение с исходной лопаткой.

Список литературы:

1. Gribin V., Gavrilov I., Tishchenko A., Tishchenko V., Popov V., Khomyakov S., Alexeev R. Features of liquid phase movement in the inter-blade channel of nozzle blade cascade // Proc. IMechE Part A: J. Power nad Energy. 2018. T. 232, № 5. С. 452–460.
2. R.A. Alexeev, V.A. Tishchenko, V.G. Gribin, I.Yu Gavrilov Turbine blade profile design method based on Bezier curves. 2017 J. Phys.: Conf. Ser. 891 012254.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда
(проект № 16-19-10484)*

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ И РАСЧЕТ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭМУЛЬСИЙ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Фаткуллина Н.Б., Абрамова О.А., Питюк Ю.А., Булатова А.З.

Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем, Башкирский государственный университет
450076, Россия, Уфа, ул. З. Валиди, 32А

Настоящая работа посвящена моделированию динамики двух вязких несмешивающихся жидкостей в неограниченной области и периодического течения двухфазной жидкости в канале в трехмерной постановке, а также расчету реологических характеристик. На протяжении многих лет оценка реологии эмульсий проводилась только экспериментальными или теоретическими методами, но в последние годы в связи с широким распространением высокопроизводительных вычислений и развитием численных методов стало возможным прямое численное моделирование динамики дисперсных систем, состоящих из деформируемых включений произвольного размера. Для определения реологических свойств эмульсий в данной работе был применен реализованный авторами ранее [1, 2, 3] эффективный численный подход к трёхмерному моделированию динамики и расчёту реологических свойств эмульсий.

Рассматривается динамика капель эмульсии в неограниченной области под действием сдвигового потока и периодическое течение эмульсии в канале и при изотермических условиях, при малых числах Рейнольдса. Рассматриваемые процессы описываются уравнениями Стокса для жидкости внутри и снаружи капель с соответствующими граничными условиями для каждой задачи. Для решения используется метод граничных элементов [5]. Поверхность рассматриваемых объектов покрывается треугольной сеткой. При увеличении масштаба задачи применение прямых методов решения СЛАУ затрудняется, так как возникает проблема нехватки памяти вычислительной системы. Для расчетов больших систем разработано несколько версий МГЭ, ускоренных с помощью распараллеливания на графических процессорах. Более подробно численная реализация описана в предыдущих работах [1, 3].

Для задачи о динамике эмульсии в неограниченной области, были проведены расчёты вклада отдельных дисперсных включений в компоненты тензора напряжений всей системы в целом. Для некоторых параметров проведено сопоставление с численными данными других авторов. Выявлены зависимости реологических характеристик от соотношения вязкостей жидкостей внутри капель и снаружи, λ , и капиллярного числа, Ca (см. рис. 1). Изучена динамика формы капель в неограниченном объеме жидкости, в микроканале. Проведено сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными, опубликованными в литературе [4, 6].

Моделирование движения капель эмульсии в стоксовом режиме в микроканалах является упрощением задач, возникающих при изучении многофазных течений в пористых средах. Несмотря на то, что модельная задача не отражает всей сложности динамики в пористой среде, она помогает изучить неко-

торые характерные закономерности поведения эмульсий в микроканалах. Численный эксперимент по расчету эффективной вязкости проводился по аналогии с определением вязкости эмульсии в капиллярном вискозиметре. Изучена динамика формы капель, относительная скорость капель в потоке, изменение относительной вязкости всей системы при различных параметрах течения.

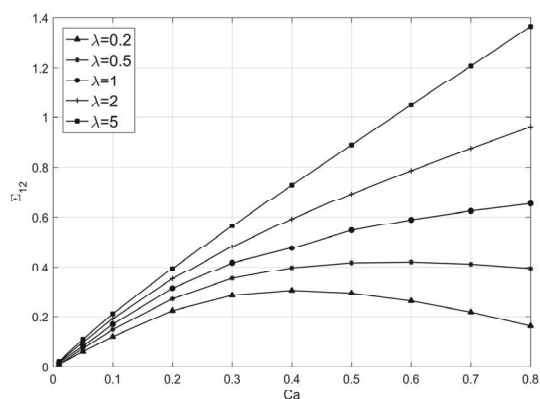


Рис. 1. Зависимость реологических характеристик от капиллярного числа Ca для различных λ

Таким образом, реализованный подход может быть использован для определения реологических параметров монодисперсных и полидисперсных слабо концентрированных эмульсий. Он позволяет изучать изменения во времени различных реологических характеристик. Изучена динамика формы капель в неограниченном объеме жидкости, в микроканале.

Список литературы:

1. Моделирование трехмерного движения деформируемых капель в стоксовом режиме методом граничных элементов / О.А. Абрамова, Ю.А. Иткулова, Н.А. Гумеров // Вычисл. мех. сплош. сред. 2013. Т. 6 №2. С. 214–223.
2. BEM Based Numerical Approach for the Study of the Dispersed Systems Rheological Properties / Yu.A. Pityuk, O.A. Abramova, N.B. Fatkulina, A.Z. Bulatova // Studies in Systems, Decision and Control. 2018. Vol 15, pp. 338–352.
3. High performance BEM simulation of 3D emulsion flow / O.A. Abramova, Yu. A.Pityuk, N. A.Gumerov, I. Sh. Akhatov // Communications in Computer and Information Science (CCIS). 2017. Vol. 53. P. 317–330.
4. Effective viscosity of an ordered suspension of small drops / A.S. Sangani, W. Lu // Journal of Applied Mathematics and Physics (ZAMP), Birkhauser Verlag Basel, 1987. Vol. 38, pp. 557–572.
5. Boundary Integral and Singularity Methods for Linearized Viscous Flow / C. Pozrikidis // Cambridge, MA: Cambridge University Press, 1992. 259 p.
6. On the transient motion of ordered suspensions of liquid drops / C. Pozrikidis // Cambridge, MA: Cambridge University Press, 1993. P. 301–320.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00074

Геотермальная энергия представляет собой тепло глубинных слоев земли, которые характеризуются гораздо большей температурой, чем температура воздуха на поверхности. Носителями подобной энергии являются геотермальные резервуары, содержащие горячую воду, либо пароводяную смесь. В отличие от солнечной или ветряной энергии, которые не функционируют во время безветренной погоды, или в ночное время, тепло Земли можно использовать постоянно. Получение больших объемов геотермальной энергии доступно далеко не всем странам мира. Эту возможность имеют, например, страны, которые располагаются в вулканических районах планеты. Исландии удалось достичь высоких показателей жизни благодаря переводу своей экономики на геотермальный ресурс. Более 90% теплоснабжения здесь основано на геотермальном тепле. Практическое значение имеют гидрогеотермальные ресурсы с относительной простотой их добычи и имеющие значительные площади распространения. При этом геотермальные месторождения с температурой воды от 40° до 100–150°C используются для теплоснабжения, а геотермальные резервуары, имеющие температуру 150–300°C могут быть использованы и для выработки электроэнергии. Геотермальная энергия является одним из перспективных видов возобновляемой энергии. Даже если использовать только ту часть земного тепла, которое находится на глубине до 10 километров, полученная энергия в несколько сотен раз превысит ту, что содержится во всех мировых запасах нефти и газа. В России ресурсы геотермальной энергетики сопоставимы по объемам со всеми вместе взятыми запасами углеводородов. На юге России геотермальные воды имеют температуру в основном от 70 до 130°C, что позволяет использовать их для теплоснабжения, в то время как на Камчатке геотермальные ресурсы имеют уже температуру достаточную для производства электроэнергии.

Однако использование геотермальных ресурсов связано с определенными рисками для окружающей среды, поскольку выбросы отработанной холодной воды могут содержать токсичные соединения. Поэтому в геотермальных станциях часто применяется технология бинарного цикла. В таких системах геотермальная жидкость после использования сразу же отправляется в систему обратного впрыска, тем самым полностью восполняя природный геотермальный резервуар и поддерживая в нем необходимое давление. Такую систему добычи горячей воды бу-

дем называть геотермальной циклической системой (ГЦС).

Для математического моделирования ГЦС используются уравнения подземной гидродинамики [1], описывающие течения в пористом грунте с учетом заданной литологии грунта [2]. ГЦС может состоять как из двух скважин [3, 4], так и из нескольких скважин [5, 6]. Одним из основных вопросов математического моделирования ГЦС является увеличение времени функционирования такой системы за счет оптимального выбора имеющихся параметров (давления, создаваемые насосами добывающей и нагнетательных скважин, и расстояния между этими скважинами).

В представленной работе учтены теплофизические характеристики геотермального резервуара, наиболее существенные технические параметры скважин, а также возможный сезонный вариант эксплуатации таких месторождений, когда в зимнее время происходит повышенное использование горячей воды, в то время, когда в летнее время такой расход существенно сокращается.

Для численной реализации описанной модели для двух скважин (добывающей с горячей водой) и нагнетательной (с холодной, отработанной водой) разработана численная методика, в основу которой были заложены идеи, использованные в работах [2–4], и ориентированные на высокопроизводительные компьютерные технологии. Приведены результаты численных расчетов.

Список литературы:

1. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод // М.: Наука, 1977. 665 с.
2. Vaganova, N.A., Filimonov, M.Yu. Simulation and Numerical Investigation of Temperature Fields in an Open Geothermal System // Lect. Notes Comput. Sci. 2015. V. 9045. P. 385–391.
3. Vaganova N., Filimonov M.Y. Refinement of model of an open geothermal system // AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1789. No. art. 020020.
4. Vaganova N.A., Filimonov M.Yu. A General Model of an Open Geothermal System // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 820. No. art. 012010.
5. Vaganova N.A. Computer Simulation of Operation of an Open Geothermal System Consisting of Multiple Wells // AIP Conference Proceedings. 2018. V. 1789. No. art. 020020.
6. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Simulation of Optimal Operation of a Multiple Wells Open Geothermal System // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1128. No. 012139.

Работа поддержана РФФИ (грант № 19-07-00435)

РАЗЛОЖЕНИЕ ГАЗОГИДРАТА МЕТАНА ПРИ ИНЖЕКЦИИ ЖИДКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ГАЗОГИДРАТНЫЙ ПЛАСТ

Хасанов М.К.¹, Столповский М.В.^{1,2}, Кильдибаева С.Р.¹, Мусакаев Н.Г.^{1,3}

¹ Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,
4531030, Россия, Стерлитамак, пр. Ленина, 49

² Уфимский государственный нефтяной технический университет,
450062, Россия, Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

³ Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
626026, Россия, Тюмень, ул. Таймырская, 74

Природные газовые гидраты представляют собой кристаллические соединения газа (чаще всего метана) и воды, образующиеся при определенных термобарических условиях. Огромные запасы природного газа, сосредоточенные в газогидратах, делают их практически неисчерпаемым источником энергии, топливом будущего [1]. Другой аспект их изучения связан с секвестрацией парниковых газов (в частности, и углекислого газа) путем их перевода в газогидратное состояние. Рядом исследователей предлагается идея инъекции диоксида углерода в природные газогидратные залежи, с целью извлечения из них природного газа и связывания диоксида углерода в газогидратной форме [2]. Такая возможность обусловлена тем, что газогидрат диоксида углерода при прочих равных условиях термодинамически более стабилен, чем газогидрат метана [3].

В данной работе численно исследован процесс инъекции жидкой двуокиси углерода в пласт конечной протяженности, изначально насыщенным метаном и его газогидратом. Предполагается, что пористый пласт, кровля и подошва которого непроницаемы и теплоизолированы, изначально насыщен метаном и его газогидратом. Исходное давление и температура соответствует условиям стабильного существования газогидрата метана. Через левую границу пласта закачивается теплая жидкая двуокись углерода. В результате инъекции диоксида углерода происходит разложение газогидрата метана на метан и воду, и дальнейшее образование газогидрата углекислого газа из жидкого диоксида углерода и выделившейся воды. Фронт вытеснения метана диоксидом углерода считается устойчивым вследствие ламинарного характера течений в пористой среде, а также того, что вязкость жидкого диоксида углерода превышает вязкость метана. Поскольку рассматриваются достаточно большие значения времени после начала нагнетания газа (порядка несколько суток), то кинетикой процессов образования и разложения газогидратов пренебрегается.

В рассматриваемом случае в пласте образуются три характерные области. В первой (ближней) области поры насыщены жидким диоксидом углерода и его гидратом, во второй (промежуточной) зоне пористая среда содержит метан и воду, а в третьей (дальней) области поры насыщены метаном и его гидратом. Таким образом, разложение газогидрата метана происходит на подвижной фронтальной поверхности, разделяющей вторую и третью область (дальней границе фазовых переходов). Образование газогидрата диоксида углерода происходит на подвижной фронтальной поверхности, разделяющей первую и вторую

область (ближней границе фазовых переходов) из воды и диоксида углерода.

При описании процессов тепломассопереноса приняты следующие допущения: скелет пористой среды и гидрат несжимаемы и неподвижны; пористость постоянна; температура пористой среды и насыщающего ее вещества совпадают; газ (метан) считается калорически совершенным, а жидкая двуокись углерода – упругой жидкостью.

Система основных уравнений представляет собой уравнения сохранения массы и энергии, закон Дарси, уравнение состояния калорически совершенного газа и упругой жидкости.

Численными расчетами получены зависимости давления на ближней границе фазовых переходов, а также температур и координат ближней и дальней границ фазовых переходов в зависимости от давления инъекции. Установлено, что с повышением давления инъекции происходит увеличение координаты границы образования газогидрата диоксида углерода и снижение температуры этой границы. При высоких значениях давлениях инъекции ближняя граница фазовых переходов может догнать дальнюю границу. В этом случае происходит замещение метана в газогидрате на диоксид углерода на единственной границе фазового перехода. Кроме того, при достаточно низких давлениях инъекции давление на ближней границе может опускаться ниже равновесного давления кипения. Поэтому в этом случае помимо области, содержащей жидкий диоксид углерода и его газогидрат, необходимо вводить в рассмотрение область, насыщенную газообразным диоксидом углерода и его газогидратом. Таким образом, при низких значениях давления инъекции в пласте дополнительно будет возникать область, насыщенная газообразным диоксидом углерода и его гидратом. При высоких значениях давления инъекции образование газогидрата будет происходить в режиме замещения.

Список литературы:

1. Соловьев В.А. Природные газовые гидраты как потенциальное полезное ископаемое // Российский химический журнал. 2003. Т.47. № 3. С. 59–69.
2. Ohgaki K., Takano K., Sangawa H., Matsubara T., Nakano S. Methane Exploitation by Carbon Dioxide from Gas Hydrates Phase Equilibria for CO₂-CH₄ Mixed Hydrate System // J. Chem. Eng. Jpn. 1996. Vol. 29. P. 478–483.
3. Kvamme B., Tanaka H. Thermodynamic Stability of Hydrates for Ethane, Ethylene, and Carbon Dioxide // The Journal of Physical Chemistry. 1995. Vol. 99. No. 18. P. 7114–7119.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда (проект № 17-79-20001)*

Черданцев М.В.¹, Исаенков С.В.¹, Черданцев А.В.^{1,2}¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Дисперсно-кольцевое течение представляет собой течение по стенкам канала пленки жидкости, обдуваемой высокоскоростным потоком газа, сопровождающееся срывом капель с поверхности пленки и уносом их в ядро газового потока. Такой режим течения реализуется в широком спектре практических приложений в аппаратах теплоэнергетики, химической, нефтегазовой и атомной промышленности. С практической точки зрения наибольший интерес представляют интегральные характеристики потока, такие как средняя толщина пленки, расход дисперсной фазы и перепад давления в канале. Даже в отсутствие подвода тепла, а также фазовых и химических превращений, расчет интегральных характеристик является нетривиальной задачей, поскольку величины определяются сложными процессами взаимодействия между газовым ядром и пленкой жидкости, включая формирование и развитие волн различных типов и масштабов на поверхности пленки, унос и осаждение капель, захват пузырьков газа пленкой жидкости. Основные результаты исследований этих процессов при помощи метода лазерно-индуцированной флуоресценции изложены в работе [1]. Дальнейшее исследование взаимосвязи между волновыми процессами и интегральными характеристиками потока требует знания значений интегральных характеристик в рассматриваемых условиях.

Данная работа посвящена прямому измерению интегральных характеристик и обобщению результатов измерений. Эксперименты проводились в адиабатическом опускном дисперсно-кольцевом течении в вертикальных трубах с внутренним диаметром 11,7 мм и 15 мм, на расстояниях от входа в канал от 12 до 80 см, при давлениях, близких к атмосферному. В качестве рабочей жидкости использовалась вода и два водоглицериновых раствора с вязкостью 1,5 и $2 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Диапазон среднерасходных скоростей газа составил от 18 до 100 м/с, диапазон чисел Рейнольдса жидкости – от 140 до 500. Перепад давления в канале измерялся при помощи дифференциального манометра; расстояние между датчиками составляло от 4 до 10 см. На основе этой величины рассчитывалось среднее по времени касательное напряжение межфазного трения. Расход дисперсной фазы измерялся при помощи зонда-пробоотборника, установленного на оси канала. По результатам измерений на разных расстояниях рассчитывалась интенсивность уноса жидкости с поверхности пленки. Средняя толщина пленки измерялась методом лазерно-индуцированной флуоресценции. Все измерения проводились на различных расстояниях от входа в канал с целью исследования развития потока.

Основным результатом проведенных измерений является то, что интегральные характеристики потока при неизменной среднерасходной скорости газа определяются, главным образом, плотностью орошения, т.е., удельным входным расходом жидкости. Пример такого обобщения для касательного напряжения трения со стороны газа приведен на рис. 1. Данные, полученные при различных значениях вязкости рабочей жидкости и в каналах различного диаметра, обобщаются единой линейной зависимостью от плотности орошения при фиксированной скорости газа и квадратичной зависимостью от скорости газа.

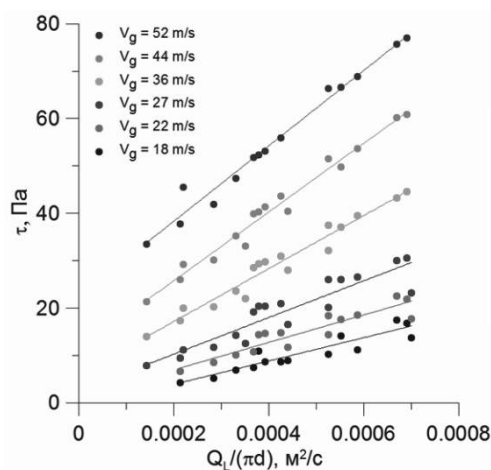


Рис. 1. Зависимость касательного напряжения межфазного трения от плотности орошения при различных скоростях газового потока.

Проведено сравнение результатов измерений с известными эмпирическими корреляционными зависимостями (например, [2–3]). Предложены новые корреляции, описывающие поведение интегральных характеристик дисперсно-кольцевого потока.

Список литературы:

1. Черданцев А.В. Волновая структура пленки жидкости и процессы обмена дисперсной фазой в дисперсно-кольцевом газожидкостном течении. Дисс. докт. физ.-мат. наук, Новосибирск, 2019.
2. Kataoka, I., Ishii, M., Nakayama, A., 2000. Entrainment and desposition rates of droplets in annular two-phase flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 43(9), 1573–1589.
3. Cioncolini, A., Thome, J.R., 2017. Pressure drop prediction in annular two-phase flow in macroscale tubes and channels. *Int. J. Multiphase Flow*, 89: 321–330.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект РНФ 16-19-10449)

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР, РАЗРЫВ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В СТЕКАЮЩИХ ПЛЕНКАХ ЖИДКОСТИ

Чиннов Е.А.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

К настоящему времени открыты различные механизмы формирования струй в нагреваемых пленках жидкости, выделено два термокапиллярных режима [1]. Структуры двух типов А и В различаются уровнем плотности теплового потока, необходимого для их возникновения, величиной и характером зависимости расстояния между струями от плотности теплового потока и числа Рейнольдса. В работе [2] выполнено исследование термокапиллярного разрыва пленки на структурах типа В при изменении в широком диапазоне числа Рейнольдса.

На основании анализа опытных данных по гидродинамике течения нагреваемой пленки жидкости установлено, что структуры типа А наблюдаются в диапазоне чисел Рейнольдса от 0.1 до 150. В условиях развитого волнового течения термокапиллярные структуры типа А формировались в остаточном слое пленки жидкости после прохождения фронта трехмерной волны. Структуры существовали ограниченный период времени и взаимодействовали с фронтом следующей волны преобразуясь в струи, которые двигались вдоль нагревателя изменяя направление, рис. 1.

В режиме В формирование струйного течения происходило постепенно с ростом теплового потока и расстояния от верхней кромки нагревателя, рис. 1.

На рис. 2. представлено обобщение опытных данных по формированию термокапиллярных структур и разрыву пленки жидкости. Сплошная черная линия обобщает данные эксперимента по разрыву пленки жидкости в условиях формирования структур типа В. Красная штриховая линия соответствует формированию термокапиллярных структур типа А, а сплошная красная линия обобщает данные по разрыву пленки жидкости, когда в результате взаимодействия гидродинамических волн со структурами указанного типа происходит рост тепловых потоков, соответствующих появлению первого устойчивого сухого пятна на поверхности нагрева.

В данной работе выполнен анализ и обобщение данных по формированию термокапиллярных структур и разрыву нагреваемой пленки жидкости, стекающей по вертикальной поверхности при изменении числа Рейнольдса от 0.1 до 500. Выделены термокапиллярные структуры разных типов. Показано, что расстояния между температурными неоднородностями (струями) термокапиллярных структур для этих режимов не зависят от числа Рейнольдса. Установлено, что формирование метастабильных термокапиллярных структур типа А в верхней части нагревателя оказывает влияние на величину критического теплового потока, соответствующего разрыву пленки жидкости. Показано, что величина критического теплового потока возрастает с увеличением числа Рейнольдса пленки и при высоких значениях Re суще-

ственно превосходит данные по разрыву в отсутствие термокапиллярных структур типа А. Установлено, что увеличение амплитуд гидродинамических волн в результате их взаимодействия с термокапиллярными структурами типа А приводит к интенсификации теплообмена. Показано, что внешние возмущения, соответствующие длине волны неустойчивости в режиме А, могут осуществлять повторное орошение осушенных зон и повышать интенсивность теплообмена.

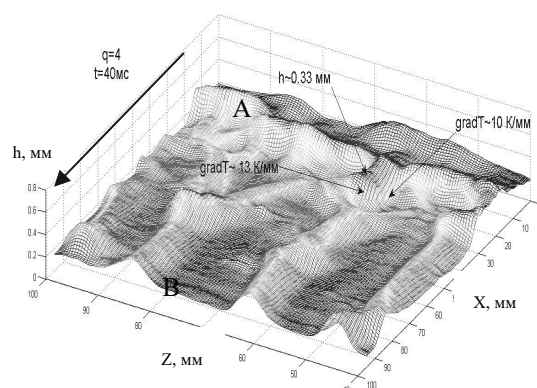


Рис. 1. Трехмерное распределение толщин и температур на поверхности пленки жидкости, $Re=50$. Стрелкой показано направление течения.

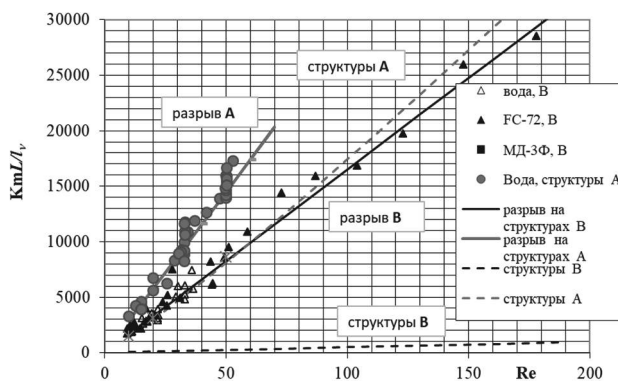


Рис. 2. Обобщение опытных данных по формированию термокапиллярных структур и разрыву пленки жидкости.

Список литературы:

1. Chinnov, E. A. and Kabov, O. A. Jet formation in gravitational flow of a heated wavy liquid film // J. App. Mech. Tech. Phys. 2003. V. 44. P 708–715.
2. Чиннов Е.А., Шарина И.А. // Теплофизика и аэромеханика, 2008, Т. 15, № 1 С. 121–130.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ
(проект No. 18-19-00407)

ПЕРЕНОС УГЛОВОГО МОМЕНТА В РАССЛОЕННЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЯХ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Шарифуллин Б.Р., Наумов И.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Исследование нелинейных эффектов и интенсификации тепломассообмена вихревого течения в системе двух несмешиваемых жидкостей, моделирующей вихревые биореакторы, имеет большой практический и фундаментальный интерес [1–3]. Изучение переноса углового момента в вихревых структурах необходимо для оптимизации конструкций и методов управления вихревыми биореакторами. В работе [2, 3] исследовано влияние проскальзывания радиальной компоненты скорости на границе раздела. В работе [4] численным моделированием показана эволюция ячейистой структуры и распространение углового момента в закрученном потоке моножидкости в длинном цилиндрическом контейнере при увеличении Re .

В настоящей работе исследован перенос углового момента и эволюция ячейистой структуры в двухкомпонентной несмешиваемой жидкости. Эксперименты проведены в вертикальном цилиндрическом контейнере ($R=47$ мм, $h=10R$) с верхним вращающимся с угловой скоростью ω диском (см. рис. 1а). В работе изучены закономерности движения жидкостей с близкими кинематическими вязкостями и близкими плотностями. Контейнер заполнен подсолнечным маслом (о) ($h_o=1R$) в качестве верхней жидкости, а в качестве нижней жидкости раствором глицерин-вода с близкой к маслу кинематической вязкостью (г) или раствором спирт-глицерин с близкой к маслу плотностью (sg). При температуре 22, 6°C плотности и кинематические вязкости рабочих жидкостей: $\rho_{sg}=922$ кг/м³, $\rho_g=1237$ кг/м³, $\rho_o=914,7$ кг/м³, $\nu_{sg}=7,366$ мм²/с, $\nu_g=42,82$ мм²/с, и $\nu_o=54,86$ мм²/с. Было проведено исследование роста ячейки циркуляции в двух случаях: (I) в моножидкости и (II) в нижней жидкости в двухкомпонентной системе (для различных высот масла $1R \leq h_o \leq 2R$). Интенсивность течения в такой системе характеризуется числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega R^2}{\nu_o}$$

Для изучения кинематических характеристик был использован метод Particle Image Velocimetry (PIV).

На рисунке 1(б, в) представлены графики зависимости длины ячейки (L/R) от Re в случае близких вязкостей. При увеличении толщины слоя масла происходит сдвиг кривой в область с большим числом Рейнольдса (см. рис. 1б). При увеличении толщины слоя масла на $\Delta h_o=0.5R$ происходит сдвиг на 200 Re , значит перенос углового момента в масле происходит линейно. На рисунке 1в представлены два графика для случая (I) и (II) при $h_o=1R$. Случай (II) можно рассматривать, как случай с жидкой крышкой. Наклон кривых одинаков, но происходит сдвиг кривой так как наличие жидкой крышки приводит к возникновению силы вязкого трения на границе раздела [2]. Данная сила замедляет поток из-за чего рост ячейки меньше чем в моножидкости.

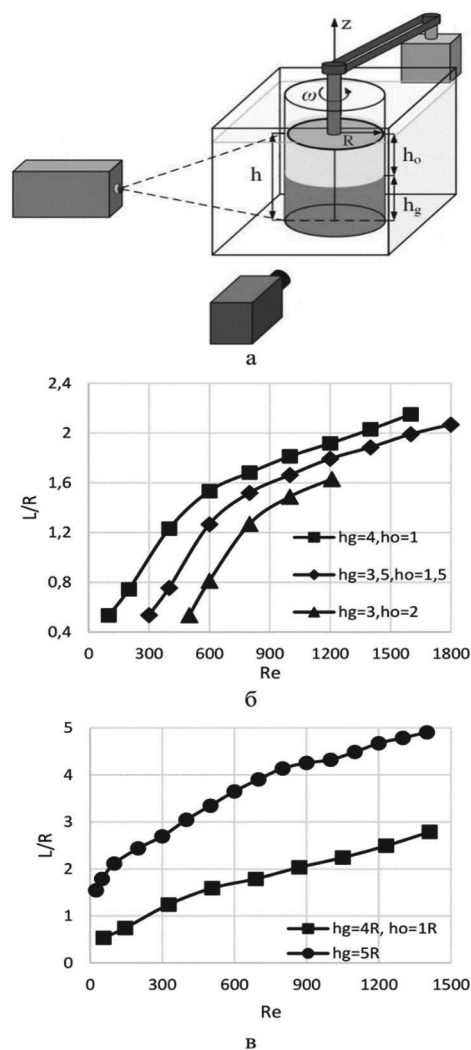


Рис. 1. Схема установки (а), длина ячейки L/R под границей раздела (б), зависимость длины ячейки от Re в случае моножидкости и двухкомпонентной при $h_o=1R$ (в).

Список литературы:

1. Naumov I.V., Herrada M.A., Sharifullin B.R., Shtern V.N. Hysteretic growth and decay of a waterspout column // Phys. Rev. Fluids. 2018. V. 3. 024701.
2. Naumov I.V., Herrada M.A., Sharifullin B., Shtern V.N. Slip at the interface of a two-fluid swirling flow // Phys. Fluids. 2018. V. 30. 074101.
3. Naumov I.V., Glavniy V.G., Sharifullin B., Shtern V.N. Multi-cellular pattern of a two-fluid swirling flow in a closed cylinder // J. Physics: Conf. Series. 2018. V.1105. 012030.
4. Herrada, M. A. The instability nature of Vogel-Escudier flow / M.A. Herrada, V.N. Shtern, M.M. Torregrosa // J. Fluid Mech. – 2015. – №766 – С. 590–610.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-19-00083

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРООРЕБРЕНИЙ НА ТЕПЛООБМЕН В ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ

Элюян К.С.¹, Роньшин Ф.В.^{1,2}, Чеверда В.В.^{1,2}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

²Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Одним из перспективных направлений по отведению высоких тепловых потоков является двухфазные системы. Имеются исследования, которые показывают эффективность использования двухфазных систем, в котором искусственно создаётся расслоенный режим течения. При таком режиме достигаются высокие коэффициенты теплоотдачи при низких перепадах давления, что важно с технической точки зрения.

Для интенсификации процессов теплообмена в двухфазной системе с расслоенным режимом течения является перспективным использованием сложных и интеллектуальных поверхностей. Для увеличения эффективности отвода тепла, предлагается использовать высокоразвитые поверхности с микроструктурами для интенсификации процессов теплообмена за счёт образования менисков и увеличения контактной линии. В настоящее время начинает бурно развиваться область аддитивного производства. Такие высокоразвитые поверхности создаются на базе аддитивных технологий, так как такая технология изготовления открывает новые возможности в техническом плане и имеет ряд преимуществ перед традиционными: возможность создать сложные микромасштабные структуры, сокращенный производственный цикл, отсутствие дефектов в образце благодаря выращиванию из наноразмерных порошков, высокая прочность изделия и точность изготовления, широкий выбор материалов для решения любых задач (авиастроение, автомобилестроение, медицина, тяжёлая промышленность и т.д.). Аддитивные технологии могут стать ключом к развитию и созданию систем охлаждения нового поколения со сложной структурой и формой.

В данной работе представлены результаты первых экспериментов по исследованию тепломассообмена в двухфазной системе: плёнка жидкости, движущаяся под действием газа с использованием локального нагревателя, поверхность которого была изготовлена с помощью аддитивных технологий. Расслоенный режим был реализован в канале прямоугольного сечения ($30 \times 0,9$ мм²), длина канала составляет 50 мм. В нижнюю стенку из нержавеющей пластины был вмонтирован нагревательный элемент источника тепла, поверхность которого имеет микрокребревание с характерным размером 400 мкм. Размер нагревателя 10×10 мм². Нагревательный элемент изготовлен с помощью 3D принтера по металлу EOS M 290. Композит алюминиевого порошка использовался в качестве материала, из которого был изготовлен нагревательный элемент с микрокребреванием. Теплопроводность материала составляет порядка 170-180 Вт/м*К. Шероховатость поверхности нагревательного элемента составляет порядка 40 мкм. В качестве рабочей жидкости использовалась вода, рабочий газ азот. Для контроля расхода газа были использованы массовые

расходомеры Bronkhorst. Для контроля температуры, измерения критического теплового потока были вмонтированы термопары в нагревательный элемент. Для оценок растечек тепла были вмонтированы термопары по периметру нагревательного элемента в нержавеющую пластину.

Проведены экспериментальные исследования теплообмена в двухфазной системе с малыми расходами жидкости и газа. При помощи шлирен-метода была проведена визуализация. Кризис теплообмена детектировался за счёт резкого изменения значений температур на термопарах, встроенных в нагреватель и с помощью визуализации. На рис. 1 отчетливо видно полное осушение нагреваемой поверхности (Рис. 1). При кризисе теплообмена, большая часть нагревателя полностью осушается, часть жидкость начинает течь по верхней стенке относительно нагревателя или обтекать по бокам за счёт термокапиллярных сил.



Рис. 1. Фотография кризиса в двухфазной системе с локальным источником нагрева. $U_{sq}=12,3$ м/с, $U_{sl}=0,026$ м/с, общая мощность нагревателя $q_{cr}=101,2$ Вт.

Приведенная скорость (U_{sq}) газа менялась в пределах от 7,4 м/с до 15,4 м/с. Приведённая скорость жидкости менялась от 0,013 до 0,026 м/с.

Список литературы:

1. T. A. Bar-Cohen, C. Holloway, Journal of Physics: Conference Series, 745, 022002 (2016).
2. T. Hirokawa, H. Ohta and O. Kabov, Interfacial Phenomena and Heat Transfer, 3, 303 (2015).
3. Mudawar I., Qu W. International Journal of Heat and Mass Transfer, 47, p. 2045, (2004).
4. O.A. Kabov, Yu.V. Lyulin, I.V. Marchuk, D.V. Zaitsev, International Journal of Heat and Fluid Flow, 28, 103 (2007).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (соглашение № 18-79-10258)

ВЛИЯНИЕ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПУЛЬСАЦИЙ НА ТЕПЛООБМЕН В ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ В МИНИКАНАЛЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Элоян К.С., Крета А.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Одной из основных проблем в области прикладной теплофизики является создание эффективной системы охлаждения для микроэлектроники, силовых чипов, «зеленых» ИТ. Современные системы охлаждения для процессоров способны отводить до 150–200 Вт/см². Разработка более эффективной и компактной системы охлаждения для электроники приведет к быстрому развитию мощной микроэлектроники. Сегодня в центрах обработки данных около 30–40% всей энергии используется системой охлаждения. В настоящее время мировая индустрия готова производить высокоэффективные электронные компоненты, где плотность теплового потока на отдельных участках может достигать 1000 Вт/см² и выше.

Одним из перспективных способов отведения больших тепловых потоков с поверхности теплонепряженных элементов электронных компонентов является использование двухфазных потоков в микроканалах. Наиболее эффективными режимами потока в канале (с точки зрения отвода тепла) являются кольцевой или слоистый поток. В передовых исследованиях предложено использовать искусственно сформированный расслоенный поток в канале, а именно тонкую пленку жидкости, движущуюся под действием потока газа в канале. Недавние экспериментальные исследования подтвердили возможность удаления тепловых потоков с плотностью до 1200 Вт/см² из зоны нагрева 10×10 мм² с использованием этого метода. Работы показали, что такая система может стабильно работать в широком диапазоне высот канала (0,17–2,00 мм) и углов наклона канала к горизонту (0–360°). Исследован теплообмен в пленке жидкости, движущейся под действием газа в канале с протяженным нагревателем (при сравнительно низких тепловых потоках).

Одной из эффективных модификаций двухфазного потока (тонкая пленка жидкости, движущаяся под действием потока газа) является добавление управляемых пульсаций в систему. В работах по двухфазным системам имеются описание влияния пульсаций на теплообмен в двухфазной системе. Влияние пульсаций на теплообмен и критический тепловой поток для двухфазной системы с R134a исследованы в работах других исследователей. Пульсации в некоторых случаях (короткий период пульсаций) приводили к увеличению теплопередачи более чем на 20%, в то время как при длительных периодах пульсаций теплообмен ухудшается.

В данной работе приведено исследование влияния контролируемых пульсаций на теплообмен в двухфазной системе в микроканале прямоугольного сечения 10×1,1 мм². Канал ориентирован горизонтально. Принципиальная схема установки приведена на рис. 1. В качестве локального источника нагрева используется медная болванка, обмотанная нихромовой нитью. Медная болванка вмонтирована в пластину из нержавеющей стали. Размер, выпирающей части поверхности нагревателя равен 10×10 мм².

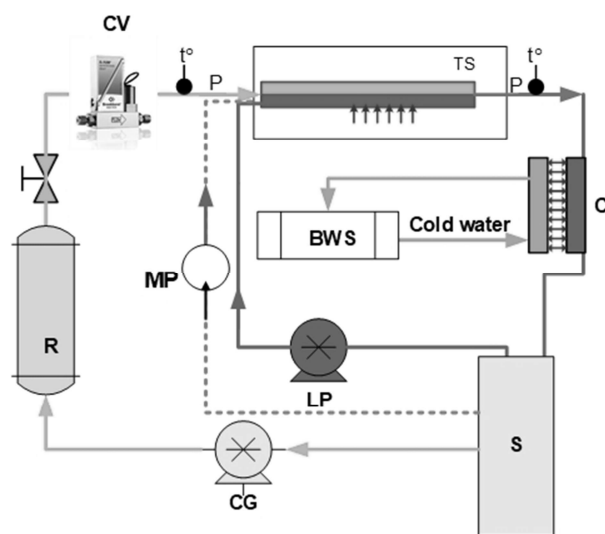


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального прототипа системы испарительного охлаждения: TS – рабочий участок; C – теплообменник; S – сепаратор; R – ресивер; CV – регулирующий клапан; LP – жидкостный насос; CG – газовый вакуумный насос-компрессор; BWS – водоснабжение здания, MP – мембранный насос.

Список литературы:

1. T. A. Bar-Cohen, C. Holloway, Journal of Physics: Conference Series, 745, 022002 (2016).
2. Zhang W., Hibiki T., Mishima K., Mi Y., International Journal of Heat and Mass Transfer, 49, p. 1058, (2006).
3. Mudawar I., Qu W. International Journal of Heat and Mass Transfer, 47, p. 2045, (2004).
4. D. Zaitsev, O. Kabov, MATEC Web of Conferences, 84, 00043 (2016).
5. P. Yang, Y. Zhang, X. Wang & Y. W. Liu, International Journal of Heat and Mass Transfer, 127, 1014–1024 (2018).

Исследование выполнено при финансовой поддержке
РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00683



СЕКЦИЯ 3

Фазовые переходы



ВСПИКАНИЕ ЖИДКОСТИ ПРИ РАЗРЫВЕ ТРУБОПРОВОДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Авдеев А.А., Кубриков К.Г.

Объединенный институт высоких температур РАН,
111116, Россия, Москва, Красноказарменная, 17А
e-mail: alex3@safe-mail.net

При разгерметизации трубы от выхода начинает перемещаться фронт волн разрежения (упругий предвестник). Скорость его движения примерно равна скорости звука в жидкости и для воды составляет величину порядка 1000 м/с. Во фронте волн разрежения давление падает ниже линии насыщения и жидкость становится перегретой. Результирующий перегрев не зависит от начального давления и определяется температурой и свойствами жидкости. В качестве примера на рис. 1 для воды показана зависимость давления начала вскипания от температуры жидкости.

После прохождения первого фронта разрежения давление в течение некоторого промежутка времени сохраняется практически неизменным. Затем формируется относительно медленный скачок вскипания (U-shock согласно терминологии [1]), который распространяется со скоростью порядка 10 м/с от выхода из трубы по массиву перегретой метастабильной жидкости. Затем давление постепенно приближается к давлению окружающей среды.

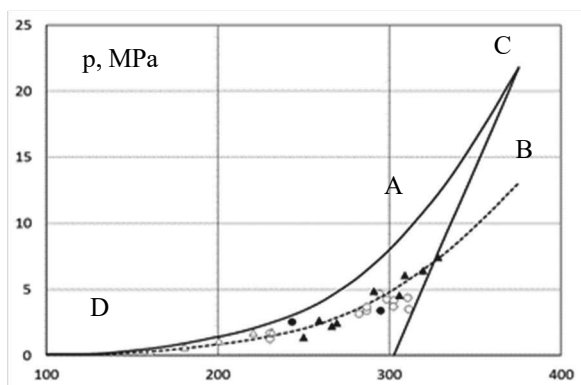


Рис. 1. Давление начала вскипания. DC — кривая насыщения, AC — спиноподаль, DB — начало вскипания.

Используя концепцию скачка вскипания [2] удастся определить скорость перемещения фронта вскипания относительно массива перегретой жидкости [3]. При этом для замыкания системы уравнений сохранения на скачке необходимо знать разность между давлением насыщения и давлением начала вскипания (pressure undershot), характеризующую начальный перегрев жидкости. Задавая эту величину по опытным данным (см. рис. 1), удастся получить хорошее согласие с экспериментом [3].

Как было показано в [4], единственной устойчивой конфигурацией скачка вскипания является конфигурация, предполагающая дозвуковую скорость перегретой жидкости перед скачком, и дозвуковую скорость движения равновесной двухфазной смеси за ним. При этом для обеспечения устойчивости необходимо существование внешнего дополнительного (не газодинамического) условия.

В рассматриваемых условиях поток вещества через поверхность разрыва будет определяться «внешними»

соображениями, связанными с закономерностями распада жидкой границы и кинетикой тепловой и механической релаксации образующейся при этом двухфазной смеси. С другой стороны, полученная таким путем величина потока вещества должна удовлетворять системе уравнений сохранения на разрыве. Это условие по существу является необходимым условием устойчивости (эволюционности) рассматриваемой ударной формации. Для рассматриваемой задачи единственным свободным параметром, входящим в систему уравнений сохранения на скачке, является величина давления закипания. Поэтому в рассматриваемых условиях эта величина должна самопроизвольно подстраиваться таким образом, чтобы условие устойчивости скачка удовлетворялось. В противном случае условия эволюционности выполняться не будут и разрыв немедленно распадется. Из сказанного можно сделать вывод о том, что при определении величины давления вскипания центральным является вопрос об адекватном описании процессов фрагментации/испарения во фронте скачка вскипания.

Как правило, рассматривается два возможных механизма процесса: вторичная цепная нуклеация и разрушение поверхности за счет развития неустойчивости Ландау. Фактором появления этой неустойчивости является динамический напор, создаваемый струями испаряющегося пара, а стабилизирующими факторами являются силы поверхностного натяжения и вязкости. В простейшем случае, пренебрегая влиянием сил поверхностного натяжения и вязкости, удастся получить критерий устойчивости скачка вскипания, позволяющий рассчитать величину провала давления, соответствующего началу интенсивного вскипания жидкости.

Интересно отметить парадоксальный, на первый взгляд момент, заключающийся в том, что в рассматриваемых условиях именно развитие неустойчивости Ландау, разрушающей передний фронт скачка вскипания, обуславливает его эволюционность. В результате, требование устойчивости скачка приводит к строго определенной величине перегрева перед его фронтом, являющейся функцией начальной температуры жидкости и ее свойств. Этот вывод хорошо подтверждается экспериментом.

Список литературы:

1. Avdeev A.A. Bubble systems. Springer Intern. Publ. AG, 2016. 482 p.
2. Лабунцов Д.А., Авдеев А.А. Теория скачка вскипания // ТВТ. 1981. Т. 19. № 3. С. 398–403.
3. Лабунцов Д.А., Авдеев А.А. Механизм нестационарного истечения вскипающей жидкости // ТВТ. 1982. Т. 20. № 2. С. 288–295.
4. Авдеев А.А. Устойчивость скачков вскипания // ТВТ. 2017. Т. 55. № 5. С. 769–777.

ЖИДКОСТЬ ПОД ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ДАВЛЕНИЕМ: ПРЕДЕЛЬНЫЕ РАСТЯЖЕНИЯ, КАВИТАЦИЯ

Байдаков В.Г.

Институт теплофизики УрО РАН,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107А

Жидкости, в отличие от газов, способны выдерживать большие растягивающие напряжения (отрицательные давления). Кавитация – разрыв сплошности жидкости с образованием в ней паровых пузырьков, широко распространенное в природе и технике явление.

В представленной работе рассматривается устойчивость растянутой жидкости относительно бесконечно малых (непрерывных) и конечных (прерывных) изменений параметров состояния. В первом случае граница устойчивости определяется термодинамическими критериями, во втором – кинетикой спонтанного зарождения и роста новой фазы [1].

При температурах ниже $0.9 T_c$, где T_c – температура в критической точке, спонтанное зарождение паровой фазы в жидкости идет с заметной скоростью только при ее растяжении ($p < 0$). Здесь радиусы критических зародышей менее 4 нм и жидкость оказывается чрезвычайно чувствительной к «загрязнениям». Это требует специфических методов исследования кавитационных процессов.

Для изучения кинетики спонтанной кавитации в жидких аргоне, азоте, кислороде и пропане использована комбинация двух динамических (импульсных) методов – инверсия импульса сжатия при его отражении от межфазной границы жидкость–газ и перегрев жидкости на тонкой платиновой проволочке, разогреваемой импульсом тока [2]. Совмещение этих методов позволило достичь частот зародышеобразования 10^{20} – 10^{22} с⁻¹м⁻³ и в ударном режиме фазового превращения реализовать гомогенный механизм зародышеобразования. Предельные растяжения в жидкости достигали 10–15 МПа.

Для продвижения в область более высоких частот нуклеации (до 10^{35} с⁻¹м⁻³) использовался метод молекулярно-динамического моделирования. Расчеты проведены в системе леннард-джонсовских частиц, моделирующий жидкий аргон. Полученные данные о предельных растяжениях и частотах нуклеации сопоставлены с расчетами по классической теории нуклеации в макроскопическом приближении, т.е. без учета зависимости свойств зародышей паровой фазы от их размера. Выявлено систематическое расхождение теории и результатов натурного и компьютерного экспериментов. Показано, что выявленное расхождение может быть устранено, если учесть зависимость поверхностного натяжения критических пузырьков от их размера. В рамках теории капиллярности Ван-дер-Ваальса для исследуемых систем определены поверхностное натяжение и работа образования критических зародышей. Использование их в расчетах дает хорошее согласие теории, эксперимента и моделирования.

По экспериментальным данным и данным молекулярно-динамического моделирования из классической теории нуклеации определена размерная зави-

симость поверхностного натяжения критических пузырьков. При положительных давлениях поверхностное натяжение пузырьков радиусом 4–5 нм на 5–7% меньше, чем на плоской межфазной границе. В области отрицательных давлений пузырьки имеют радиус 2–3 нм, а их поверхностное натяжение на 12–15% меньше своего плоского предела. По полученным данным рассчитана первая поправка к поверхностному натяжению пузырька на кривизну межфазной границы – длина Толмена, которая определяется состоянием между эквимолекулярной разделяющей поверхностью и поверхностью натяжения. Показано, что для адекватного отображения размерной зависимости поверхностного натяжения аппроксимирующая зависимость, помимо линейного, должна содержать также квадратичный по кривизне член.

Для определения термодинамических свойств жидкостей под отрицательным давлением разработана экспериментальная установка, позволяющая с помощью опто-волоконной техники измерять коэффициент преломления и плотность. Растяжения жидкости, как и в опытах по исследованию нуклеации, создавались при отражении волны сжатия от межфазной границы жидкость–газ. Опыты проведены с жидким кислородом. При отрицательном давлении p , ρ , T – свойства жидкого кислорода также исследованы методом молекулярно-динамического моделирования.

Разработано единое для жидкой и газовой фаз уравнение состояния кислорода, описывающее его стабильные и метастабильные состояния, включая область отрицательных давлений. Метод построения уравнения состояния базируется на термодинамическом соотношении, устанавливающем связь между второй производной от давления по температуре при постоянной плотности и первой производной от изохорной теплоемкости по плотности при постоянстве температуры. Изохорная теплоемкость метастабильной жидкости определена в компьютерном эксперименте. Эти данные, совместно с результатами p , ρ , T – измерений, использованы при построении уравнения состояния. В обрабатываемый массив данных были включены ортобарические плотности, давление насыщенных паров, которые учитывались с помощью правила Максвелла. Уравнение состояния позволило рассчитать весь комплекс термодинамических свойств метастабильного кислорода при отрицательных давлениях.

Список литературы

1. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость / В.П. Скрипов. М.: Наука, 1972. 312 с.
2. Baidakov V.G., Vinogradov V.E. Limiting stretchings of liquid oxygen: Experiment and classical nucleation theory // J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 129. P. 1057–1065.

*Исследование выполнено при поддержке Российского
научного фонда (проект 18-19-00276)*

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ СТАБИЛЬНОСТИ СМЕШАНЫХ ГИДРАТОВ H_2+CO_2 СТРУКТУР КС-I И КС-II

Белослудов В.Р.^{1,2}, Жданов Р.К.^{1,2}, Божко Ю.Ю.^{1,2}, Субботин О.С.^{1,2}

¹ Институт неорганической химии им. А. В. Николаева, СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 3

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова 2В

В процессе газификации, то есть окисления твердого и жидкого топлива в атмосфере кислорода, воздуха, водяного пара, углекислого газа при температуре 1000–2000 °С и давлении до 10 МПа, в газовую фазу переходит до 80% органической части топлива: нефти, угля, торфа, мазута и гудрона. В процессе газификации помимо энергии происходит образование газовой смеси H_2+CO_2 (в процессе синтеза Фишера-Тропша). Данная смесь является одним из основных источников водорода, который является экологически чистым и безопасным видом топлива, так как продуктом его горения является вода. Для разделения газовой смеси на составляющие используются клатратные гидраты [1, 2]. Клатратные гидраты – это соединения включения, образованные решеткой – хозяином (молекулами воды в данном случае) и помещенными в неё молекулами – гостями. Декомпрессия гидрата H_2+CO_2 проходит с высвобождением водорода, который может использоваться в топливных элементах или газовых турбинах тогда, как оставшийся CO_2 в гидратной форме может быть утилизирован [3] или использован в процессе формирования углеводородов.

Чистый водород образует гидрат кубической структуры II (КС-II), тогда как чистый углекислый газ приводит к образованию гидрата кубической структуры I (КС-I). Структура смешанного гидрата зависит как от термодинамических условий, так и состава газовой смеси.

В данной работе был применен разработанный ранее метод, основанный на теории ван дер Ваальса-Платтеу, для определения областей стабильности гидратов H_2+CO_2 структур КС-I и КС-II, находящихся в равновесии с газовой фазой, в широком диапазоне давлений и температур при различном составе газовой фазы и определения термодинамических свойств газовых гидратов. Результаты этой работы необходимы для разработки абсорбционной технологии разделения смеси H_2+CO_2 и очистки водорода.

Гидрат структуры КС-I имеет полости двух типов: малые (пентагональные додекаэдры, 5^{12}) и большие

(тетракайдекаэдры, $5^{12}6^2$). Гидрат структуры КС-II аналогично имеет полости двух типов: малые (5^{12}) и большие (гексакайдекаэдры, $5^{12}6^4$). В связи с малым размером молекул водорода важен учет многократного заполнения малых (до двух молекул водорода) и больших (до четырех молекул водорода) полостей гидрата. Молекулы углекислого газа являются достаточно большими, поэтому для них рассматривается только однократное заполнение малых и больших полостей.

Было проведено исследование областей стабильности и фазовых переходов в системе «лед Ih – гидрат H_2+CO_2 КС-I – гидрат H_2+CO_2 КС-II – газовая смесь» методом решеточной динамики с использованием модифицированного потенциала SPC/E аналогично работе [4]. Исследование было проведено при давлениях от 0 до 200 МПа и температурах от 240 до 280 К, а также различных концентрациях углекислого газа, и построена рТ-диаграмма областей стабильности исследуемых фаз. Было проведено сравнение полученных результатов с известными экспериментальными данными. Разработанная методика может быть использована для получения очищенного водорода.

Список литературы:

1. Li X.S., Xu C.G., Yu Y.S. Apparatus and combined process for carbon dioxide gas separation. // USA Pat. 2016. 15/487.765.
2. Linga P., Kumar R., Englezos P. Gas hydrate formation from hydrogen/carbon dioxide and nitrogen/carbon dioxide gas mixtures // Chemical engineering science. 2007. V. 62. pp. 4268–4276.
3. Klara S.M., Srivastava R.D. US DOE integrated collaborative technology development program for CO_2 separation and capture // Environmental progress. 2002. V. 21. pp. 247–253.
4. Belosludov V., Bozhko Y., Subbotin O., Belosludov R., Zhdanov R., Gets K., Kawazoe Y. Influence of N_2 on Formation Conditions and Guest Distribution of Mixed CO_2+CH_4 Gas Hydrates. // Molecules. 2018. V. 23. pp. 3336 – 1–15.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИИХ РАН в области фундаментальных научных исследований, проект V.44.4.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДВОЙНЫХ ГИДРАТОВ ОЗОНА И АРГОНА, ОЗОНА И ДИОКСИДА УГЛЕРОДА МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ И РЕШЕТОЧНОЙ ДИНАМИКИ

Божко Ю.Ю.^{1,2}, Гец К.В.^{1,2}, Субботин О.С.^{1,2}, Белослудов В.Р.^{1,2}

¹ Институт неорганической химии им. А. В. Николаева, СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 3

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова 2

Клатратные гидраты представляют собой твёрдые вещества, структуру кристаллического каркаса которых образуют молекулы хозяина, воды в данном случае, связанные между собой водородными связями. В полостях этих структур могут находиться гидрофобные газы или легколетучие жидкости (гости) [1]. Взаимодействие молекул-гостей в гидрате между собой ограничено стенками полости (за счет сил ван-дер-Ваальса). Это свойство гидратов может быть использовано для хранения химически нестабильных веществ, например таких как озон.

Озон является сильным окислителем и широко используется как экологически чистый дезинфектор и дезинсектор в медицине, промышленности и сельском хозяйстве, а также стерилизации скоропортящихся продуктов. Окислительные свойства озона обусловлены образованием свободных радикалов, представляющих угрозу для человека, что ставит вопрос о разработке технологии для длительного и безопасного хранения озона. Одним из подходящих решений является образование газовых гидратов, содержащих озон. Было показано, что использование других газов вместе с озоном может существенно увеличить время жизни озона (стабилизировать его) в гидратной форме.

Целью данной работы является нахождение структуры и термодинамических свойств смешанных гидратов озона и диоксида углерода, озона и аргона с целью поиска наиболее стабильных структур озонсодержащих гидратов и описание областей их стабильности.

Для изучения структурных и термодинамических свойств гидратов O_3+Ar и O_3+CO_2 различных структур был использован комбинированный подход, включающий в метод молекулярной динамики (GROMACS) и метод решеточной динамики, реализованный в собственном пакете программ. Для описания взаимодействия между молекулами воды использовался модифицированный потенциал SPC/E, ранее эта модификация позволила получить хорошее согласие с экспериментальными данными при расчете свойств различных гидратов [2]. Расчеты кулонов-

ского взаимодействия проводились методом Эвальда, расчет сил ван-дер Ваальса велся в рамках потенциала Леннард-Джонса. Атомы водорода были расставлены по правилу льда таким образом, чтобы полный дипольный момент рассматриваемых ячеек был равен нулю [3].

Для расчетов были использованы элементарные ячейки гидрата кубической структуры I (КС-I) и кубической структуры II (КС-II). Элементарная ячейка гидрата КС-I состоит из 46 молекул воды, которые образуют 6 больших и 2 малых полости. Элементарная ячейка гидрата КС-II включает в себя 136 молекул воды, которые образуют 8 больших и 16 малых полостей. В полости были помещены молекулы O_3 , CO_2 и Ar . Молекулы диоксида углерода и озона могут лишь однократно заполнять большие и малые полости, атомы аргона могут заполнять большие полости многократно, а малые полости гидратов гидрата КС-I и КС-II однократно.

Были рассчитаны координаты молекул структур и термодинамические свойства смешанных гидратов O_3+Ar и O_3+CO_2 . Описанная модель позволила найти равновесный состав смешанных гидратов при заданных значениях температуры и давлении. Показано влияние содержания аргона и диоксида углерода на область термодинамической стабильности клатратных гидратов озона КС-I и КС-II, что дает возможность для определения термодинамических условий хранения и транспортировки озона в виде смешанных клатратных гидратов O_3+Ar и O_3+CO_2 .

Список литературы:

1. Clathrate Hydrates of Natural Gases [third ed.] / E.D. Sloan, C.A. Koh. Boca Raton FL: Taylor & Francis-CRC Press, 2008. 752 p.
2. Belosludov V.R., Subbotin O.S., Krupskii D.S., Prokuda O.V., Belosludov R.V., Kawazoe Y. Microscopic model of clathrate compounds. // J.Phys.: Conference Series. 2006. V. 29. pp. 1–7.
3. Bernal J.D., Fowler R.H. A Theory of Water and Ionic Solution, with Particular Reference to Hydrogen and Hydroxyl Ions. // J. Chem. Phys. 1933. V. 1. pp. 515–548.

*Работа поддержана РФФИ
грант №18-08-00803*

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРОЦЕСС ИСПАРЕНИЯ ЛЕЖАЩИХ КАПЕЛЬ ВОДЫ

Бородулин В.Ю., Летушко В.Н., Низовцев М.И., Стерлягов А.Н.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

В настоящее время в связи с широкой областью практических приложений большое внимание уделяется исследованию испарения капель жидкостей, лежащих на структурированных поверхностях [1, 2]. В большинстве экспериментальных исследований рассматривается, как правило, изменение геометрических параметров капель, и измерения температуры выполняются контактными методами. В данном случае весьма перспективным для измерения температуры испаряющихся капель является бесконтактный метод инфракрасной термографии [3].

В работе выполнены экспериментальные исследования испарения капель воды, лежащих на гладкой и структурированной поверхностях фторполимера Teflon AF 1600. Структурированная поверхность получена методом штамповой нанолитографии [4] и представляла собой многоуровневые неупорядоченные структуры с цилиндрическими столбиками диаметром около 1 мкм и высотой 2–4 мкм. Экспериментальные исследования проводились с каплями объемом 5 мкл при постоянной температуре и влажности окружающего воздуха ($t=24^\circ\text{C}$, $\phi=24\%$). С помощью микроскопа определено, что на гладкой поверхности исследуемого материала красовой угол смачивания воды составлял 104° , а на структурированной – 141° . Применение скоростной микрофото съемки позволило наблюдать изменение геометрических параметров испаряющихся капель (рис. 1).

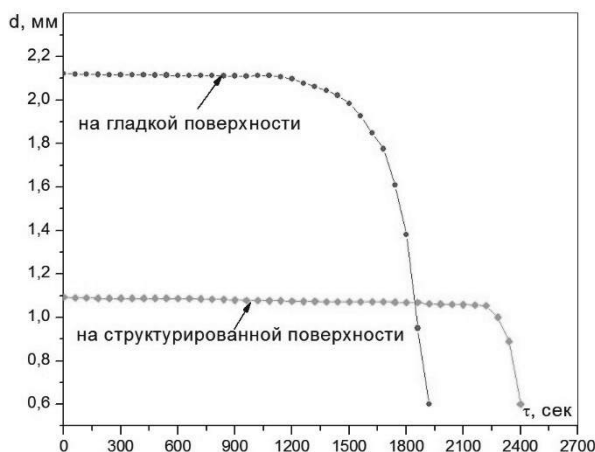


Рис. 1. Изменение диаметра пятна контакта капель воды, испаряющихся на гладкой и структурированной поверхностях.

Полученные результаты показывают, что для капль воды, лежащих на гладкой и структурированной поверхностях диаметр пятна контакта слабо изменялся в течение основного времени испарения, и реализовался режим испарения с постоянной контактной линией. Однако на гладкой поверхности диаметр пятна контакта составлял около 2,12 мм, а на структурированной поверхности – 1,09 мм. В работе с помощью метода инфракрасной термографии исследо-

вана динамика изменения температуры поверхности испаряющихся капель (рис. 2).

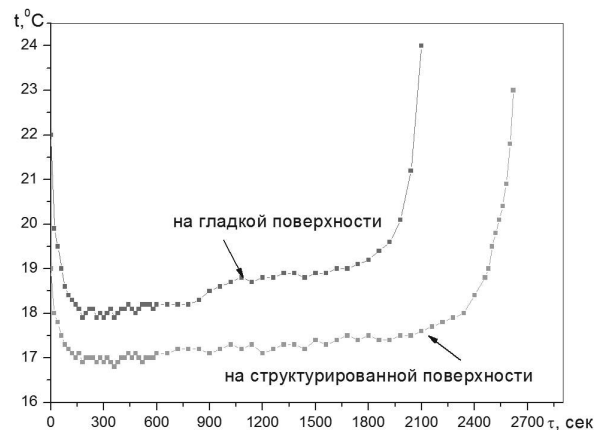


Рис. 2. Изменение температуры капель воды, испаряющихся на гладкой и структурированной поверхностях.

Из анализа полученных данных следует, что в характере изменения температуры капли воды на различных поверхностях можно условно выделить стадии: начальный участок резкого падения температуры; стадия постоянной температуры, и стадия плавного повышения до температуры окружающего воздуха. При этом наблюдались отличия температуры капель на стадии с постоянной температурой: для гладкой поверхности она была $18,2^\circ\text{C}$, для структурированной – $17,0^\circ\text{C}$. Кроме того значительно отличалось время испарения. На гладкой поверхности оно составляло 2100 секунд, а на структурированной поверхности – 2620 секунд. Очевидно, что данные отличия обусловлены различной формой капель вследствие различной смачиваемости поверхностей. Чем больше площадь пятна контакта, тем больше подвод тепла к капле от поверхности и соответственно меньше время ее испарения.

В работе с использованием диффузионно-эмиссионной модели выполнены расчеты испарения капель воды на рассмотренных поверхностях, показавшие удовлетворительное согласие с экспериментальными данными.

Список литературы:

1. Lee C.Y., Zhang B.J., Park J., Kim K.J. Water droplet evaporation on Cu based hydrophobic surfaces with nano and micro-structures // Int. J. Heat Mass Transfer. 2012. V. 55. P. 2151–2159.
2. Shin D. H. et al. Evaporating characteristics of sessile droplet on hydrophobic and hydrophilic surfaces // Microelectronic Engineering. 2009. T. 86. №. 4–6. P. 1350–1353.
3. Borodulin V.Y., Letushko V.N., Nizovtsev M.I., Sterlyagov A.N. Determination of parameters of heat and mass transfer in evaporating drops // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. T. 109. P. 609–618.
4. Корнеев И.А., Селезнев В.А., Принц В.Я. Создание и исследование микро- и наноструктурированных сверхгидрофобных и антиобледенительных поверхностей // Российские нанотехнологии. 2017. T. 12. № 9–10. С. 20–29.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИДРАТА ТЕТРАБУТИЛ АММОНИЯ БРОМИДА

Гец К.В.^{1,2}, Субботин О.С.^{1,2}, Белослудов В.Р.^{1,2}, Божко Ю.Ю.^{1,2}, Жданов Р.К.^{1,2}

¹ Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 3

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Соединения включения, образованные молекулами воды и четвертичными аммониевыми или фосфониевыми солями, являются представителями обширной группы ионных клатратных гидратов (ИКГ) или полуклатратных гидратов, структуры которых были детально исследованы Джеффри [1]. Наибольший интерес представляют хлорид и бромид этих солей в связи с их низкой токсичностью и стабильностью полученных структур гидрата. В отличие от обычных клатратных гидратов, где молекулы-гости взаимодействуют с решёткой хозяина (молекулами воды) только посредством сил Ван-дер-Ваальса, включённые в структуру ИКГ четвертичные соли образуют более сильные химические связи с решёткой хозяина.

ИКГ могут содержать молекулы-гости только в небольших додекаэдрических полостях (5^{12}). Большие полости заняты бутильными цепочками катионов и анионов. Однако, наиболее важным свойством является значительное снижение давления (или повышение температуры) образования гидратов в присутствии этих солей [2], а нерегулярность структуры приводит к повышенной селективности для молекул аналогичного размера [3]. Низкая стоимость образования гидратов делает ИКГ перспективным материалом для разделения [4] дымовых и топливных газовых смесей, а также для отделения парникового углекислого газа для его последующей утилизации в виде гидрата. Также возможно использование ИКГ для аккумуляции энергии, её хранения и транспортировки для различных применений.

Экспериментальные исследования подобных соединений связаны с серьёзными трудностями. В данной работе было проведено теоретическое исследование термодинамических свойств гидрата бромида тетрабутиламмония (ТБА), $C_{16}H_{36}NBr$, с помощью комбинированного подхода, включающим в себя метод молекулярной динамики и развитый авторским коллективом метод решёточной динамики [5]. Исследуемая модель содержала 76 молекул воды (2 элементарные ячейки орторомбической структуры ИКГ) и 2 молекулы бромида ТБА. Молекулы соли были расположены так, чтобы компенсировать дипольные моменты друг друга.

Метод молекулярной динамики был реализован в виде метода сопряжённых градиентов, исключающего тепловое движение молекул воды и позволяющий проводить оптимизацию структуры гидрата – находить минимум потенциальной энергии каждой молекулы в исследуемой системе. В рамках метода решё-

точной динамики были определены фоновые спектры оптимизированной структуры ИКГ бромида ТБА и найдены плотности фоновых состояний этого гидрата в зависимости от температуры в пределах от 230 К до 283 К. Расчёт фонового спектра позволил оценить вклад колебательной энергии молекул и, соответственно, свободную энергию Гельмгольца в зависимости от температуры системы. Моделирование проводилось в рамках модифицированного потенциала SPC/E [5] для молекул воды и потенциала OPLS-AA для элементов цепочек солей.

Использованный подход позволил изучить динамические свойства гидрата бромида ТБА и показать влияние молекул соли на фоновый спектр рассматриваемого ИКГ и показана динамическая стабильность гидрата, отсутствие ангармонических колебаний, для ряда температур. С использованием развиваемой статистико-термодинамической теории [5] построены кривые свободной энергии для широкого набора температур при различных объёмах элементарной ячейки. На основе расчётных данных, построены линии теплового расширения гидрата в зависимости от давления. Анализ и сравнение полученных данных с коэффициентом расширения кристаллического льда гексагональной структуры Ih позволило сделать вывод о возможности выявления эффекта самоконсервации в ИКГ бромида ТБА.

Список литературы:

1. Hydrate inclusion compounds / G.A. Jeffrey, In: Inclusion Compounds; Editors: J.L. Atwood, J.E.D. Davies, D.D. MacNicol. London: Academic Press, 1984. pp. 135–190.
2. Hashimoto H., Yamaguchi T., Ozeki H., Muromachi S. Structure-driven CO₂ selectivity and gas capacity of ionic clathrate hydrates. // Sci. Rep. 2017. V. 7. pp. 17216–17.
3. Muromachi S., Udachin K.A., Alavi S., Ohmura R., Ripmeester J.A. Selective occupancy of methane by cage symmetry in TBAB ionic clathrate hydrate. // Chem. Commun. 2016 V. 52. pp. 5621–5624.
4. Mohammadi A.H., Richon D. Phase Equilibria of Semi-Clathrate Hydrates of Tetra-n-butylammonium Bromide + Hydrogen Sulfide and Tetra-n-butylammonium Bromide + Methane. // J. Chem. Eng. Data. 2010. V. 55. pp. 982–984.
5. Belosludov R.V., Subbotin O.S., Mizuseki H., Kawazoe Y. Belosludov V.R. Accurate description of phase diagram of clathrate hydrates at the molecular level. // J. Chem. Phys. 2009. V. 131. pp. 244510–1–12.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХХ РАН в области фундаментальных научных исследований, проект V.44.4.9

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ГИДРАТОВ АЗОТА ВНЕ ЗОНЫ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ

Жданов Р.К.^{1,2}, Гец К.В.^{1,2}, Божко Ю.Ю.^{1,2}, Субботин О.С.^{1,2}

¹ Институт неорганической химии им. А. В. Николаева, СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 3

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова 2

Клатратные гидраты – это соединения, которые образуются помещением молекул-гостей, в полости каркаса-хозяина, состоящего из молекул воды. Термодинамическая устойчивость подобных соединений обеспечивается благодаря расположению молекул-гостей в полостях каркаса-хозяина, вследствие чего слабые межмолекулярные взаимодействия приводят к выигрышу энергии по сравнению с энергией каждого компонента в отдельности. Клатратные гидраты могут служить основой для создания новых технологий хранения газов, а также использованы для эффективного разделения газовых смесей. Помимо этого образование гидратов может быть использовано для улавливания выброса промышленных газов на производстве и их длительному хранению. Исследования по этим направлениям в настоящее время ведутся очень интенсивно.

В ходе исследования клатратных гидратов был обнаружено, что гидраты некоторые газов способны долгое время существовать при условиях, выходящих за область их термодинамической стабильности, а именно при снижении давления до атмосферного. Данный эффект был назван эффектом самоконсервации или аномальным сохранением [1]. Использование данного эффекта способно значительно упростить применение клатратных гидратов для хранения газов, т.к. необходимым оказывается только поддержание необходимой температуры. В настоящее время основные работы по данной тематике имеют общий характер и не заостряют свое внимание на особенностях того или иного газа, т.к. данные особенности способны играть существенную роль, когда речь заходит о конкретном приложении. Кроме этого, на текущий момент наиболее популярное объяснение эффекта самоконсервации предполагает наличие кинетического барьера для диффузии газа через слой льда на поверхности гидрата, который образуется при начальном плавлении самого гидрата. Точное объяснение эффекта и его механизмов до сих пор остаются до конца не ясными.

В данной работе было проведено исследование эффекта самоконсервации в системе «лед Ih – гидрат азота кубической структуры II – газ» комбинацией методов молекулярной динамики (LAMMPS) и методов решеточной динамики (набор оригинальных программ, созданных авторами) в связи со статистическо-термодинамической моделью соединений включения [2]. Методами молекулярной динамики была воссоздан кластер гидрата азота, покрытый слоем

льда. По результатам моделирования было показано, что на границе раздела фаз гидрата и льда происходит сшивка сетки водородных связей, что создает единую систему, и была показана кинетическая стабильность системы гидрат-лед.

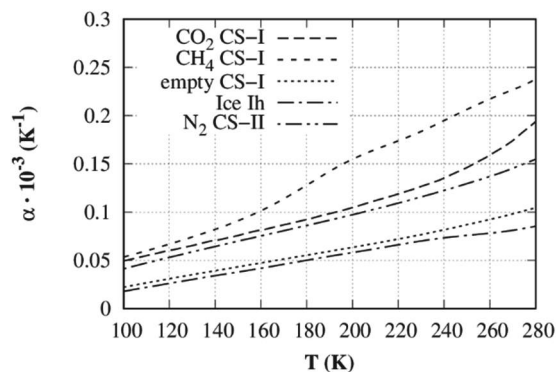


Рис. 1. Зависимость коэффициента термического расширения гидратов метана, углекислого газа, азота, льда Ih, пустой структуры KC-I в зависимости от температуры.

Применение статистическо-термодинамической модели соединений включения дало возможность получить макроскопические свойства гидрата, в частности коэффициента термодинамического расширения в зависимости от температуры. Было показано, что гидрат имеет больший коэффициент расширения в сравнении с фазой льда или пустой решетки гидратов (рис. 1). Согласно результатам расчетов коэффициент термического расширения гидрата азота практически совпадает со значением, полученным ранее, для гидрата углекислого газа, что при наличии единой сетки водородных связей является ключевым фактором, отвечающим за стабильность данной системы и наличия эффекта самоконсервации в целом.

Список литературы:

1. Stern L.A., Circone S., Kirby S.H., Durham W.B. Anomalous preservation of pure methane hydrate at 1 atm. // J. Phys. Chem. B. 2001. V. 105. pp. 1756–1762.
2. Belosludov R.V. et al. Hydrogen hydrates: Equation of state and self-preservation effect // Fluid Phase Equilibria. 2016. V. 413. pp. 220–228.

Работа поддержана РНФ (грант №18-19-00124)

**УДАРНО-ВОЛНОВЫЕ И ДЕТОНАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕД****Зубарева А.Н., Лавров В.В., Уткин А.В.**Институт проблем химической физики РАН,
142432, Россия, Черноголовка, проспект ак. Семенова, 1

В химически активных средах пористость меняет не только термодинамические свойства среды, но и оказывает принципиальное влияние на макрокинетику химических реакций при ударно-волновом воздействии. Формирование «горячих точек», в результате схлопывания пор, создает очаги, из которых волны реакции распространяются на весь объем вещества и могут привести к установлению стационарных детонационных волн. Именно этот механизм является определяющим при построении кинетических соотношений для моделирования детонационных процессов в пористых взрывчатых веществах [1]. Использование стеклянных микросфер позволяет контролировать пористость среды, распределение пор по размеру, а, следовательно, и характеристики горячих точек. Этим обусловлен интерес к исследованию химически активных сред с микросферами [2–4].

В работе проведено экспериментальное исследование ударно-волновых свойств и структуры фронта импульсов сжатия химически активных пористых сред, включая как область низких, порядка 0.1 ГПа, так и высоких, порядка 35 ГПа, давлений.

В качестве объекта исследования рассмотрена эмульсия на основе нитрата аммония (NH_4NO_3), следующего состава: 76.8% – нитрат аммония, 15.4% – H_2O , 6.6% – минеральное масло, 1.2% – эмульгатор. Плотность эмульсионной матрицы $\rho_0 = 1.35 \text{ г/см}^3$. Пористость в образцах создавалась добавлением стеклянных микросфер со средним размером частиц около 80 мкм. Использование стеклянных микросфер позволяет контролировать пористость среды, распределение пор по размеру, а, следовательно, и характеристики «горячих точек».

Профили скорости свободной поверхности для образцов при ударно-волновом нагружении измерялись лазерным доплеровским интерферометром VISAR. Полученные профили имеют достаточно сложную структуру фронта ударной волны, возможной причиной которой является кинетика схлопывания пор в исследуемых гетерогенных образцах.

В экспериментах на получение ударной адиабаты для эмульсионной матрицы создавались давления до 35,2 ГПа, но это оказалось ниже порога возникновения химической реакции при длительности импульса сжатия не превышающей 0,5 мкс. Показано, что ударная адиабата эмульсионной матрицы хорошо описывается обобщенной ударной адиабатой Гибсона для жидкостей [5].

Добавление к эмульсионной матрице микросфер позволяет получать эмульсионные взрывчатые вещества с различными параметрами в точке Чепмена-Жуге и контролируемой чувствительностью к ударно-волновому воздействию. Так, например, при внесении в матрицу 3% микросфер формируется стационарная детонация с давлением около 7 ГПа. При этом характерная ширина зоны реакции составляет примерно 1 мкс.

В рамках работы по влиянию пористости на возникновение химической реакции в веществе проводились эксперименты с разной концентрацией стеклянных микросфер. Наряду с детонационными свойствами была определена ударная сжимаемость эмульсионной матрицы с 1% микросфер, а также исследована структура фронта волны сжатия при низких давлениях. Показано, что на профилях массовой скорости регистрируется двухволновая конфигурация, отличительной особенностью которой является установление стационарного течения, при котором волны не расходятся с увеличением толщины образца. Возникновение предвестника связано с наличием в исследуемом веществе стеклянных микросфер, а его амплитуда, равная 30 МПа, определяется давлением разрушения микросфер.

Список литературы:

1. Ударно-волновые явления в конденсированных средах / Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортков В.Е. – М.: «Янус-К». – 1996. – 408 с.
2. Сильвестров В.В., Юношев А.С., Пластинин А.В., Рафеевич С.И. Ударная сжимаемость эмульсионной матрицы при давлении до 37 ГПа // ФГВ. 2014. Т.50. №4 С. 110–116.
3. Сильвестров В.В., Юношев А.С., Пластинин А.В. Ударная адиабата эмульсионной матрицы на основе водного раствора аммиачной селитры. // ФГВ. 2014. Т.50. №6 С. 105–108.
4. Юношев А.С., Сильвестров В.В., Пластинин А.В., Рафеевич С.И. Влияние искусственных пор на параметры детонации эмульсионного взрывчатого вещества // ФГВ. 2017. Т. 53. №2 С. 91–97.
5. Gibson L.L., Sheffield S.A., Dattelbaum D.M., Stahl D.B. Shock initiation and detonation properties of bisfluorodinitroethyl formal (FEFO) // AIP Conference Proceedings. – AIP, 2012. – V. 1426. – № 1. – P.323–326.

*Работа выполнена в рамках программы
Президиума РАН «Фундаментальные проблемы
теплофизических и механических явлений в веществе
при высокой плотности энергии»
и на оборудовании ЦКПВ ИПХФ РАН*

ДИНАМИКА ВЗРЫВНОГО КИПЕНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ЖИДКИХ СМЕСЕЙ

Козулин И.А.^{1,2}, Кузнецов В.В.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Развитие высокотехнологичного производства в различных областях техники обуславливает необходимость разработки микроразмерных устройств с размером элементов меньше 100 мкм [1]. К таким устройствам относятся микроэлектромеханические системы (МЭМС), основанные на взрывном кипении жидкости [2]. Несмотря на то, что характеристики взрывного кипения однокомпонентных жидкостей хорошо изучены, присутствие в смеси второго компонента может существенно изменить температуру взрывного фазового перехода и его динамику. В данной работе проведено экспериментальное исследование взрывного кипения двухкомпонентных смесей вода-изопропанол и вода-этанол на плоском многослойном микронагревателе 100x110 мкм с внешним слоем, образованном карбидом кремния.

Для исследования взрывного кипения использован оптический метод, основанный на измерении интенсивности лазерного излучения, диффузно отражённого от поверхности микронагревателя [3]. Схема стенда для исследования взрывного кипения показана на рис. 1 (а). Фотография микронагревателя с размером 100x110 мкм представлена на рис. 1 (б).

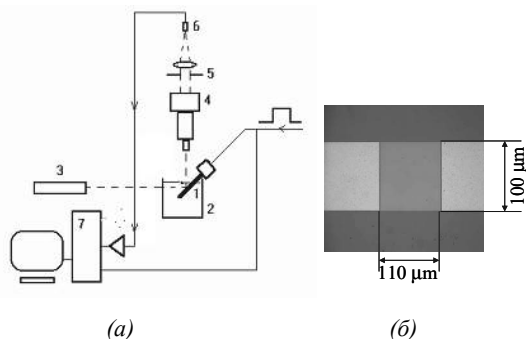


Рис. 1. Схема экспериментального стенда.

В экспериментах многослойный микронагреватель (1) погружался в кювету с жидкостью (2). Начальная температура жидкости изменялась от 20 до 23 °С. Одиночные прямоугольные импульсы тока подавались на резистор микронагревателя (1) для нагрева жидкости. Для изучения взрывного кипения использована оптическая методика регистрации зародышеобразования, основанная на измерении интенсивности лазерного излучения (3), диффузно отражённого от поверхности нагревателя, с использованием микроскопа (4) и диафрагмы (5). Интенсивность излучения измеряется фотодиодом (6) и быстрым АЦП (7). При возникновении микропузырьков интегральный коэффициент диффузного отражения падает, и сигнал с фотоприёмника регистрирует динамику заполнения поверхности нагревателя паровыми пузырьками.

Экспериментально установлены закономерности взрывного кипения смеси с различной объемной концентрацией спирта c_0 при высокоэнергетическом воздействии тепловыми импульсами. Определены условия, при которых температура начала взрывного фазового перехода в бинарном растворе, который не подчиняется в полной мере законам Рауля и Генри, не соответствует линейной зависимости от мольной концентрации легколетучего компонента. На рис. 2 приведена зависимость температуры взрывного кипения смеси вода-изопропанол в зависимости от скорости роста температуры жидкости dT/dt и c_0 , пунктирной линией приведен расчет температуры предельного перегрева на основе данных [4] в приближении линейной зависимости от мольной концентрации легколетучего компонента. На рис. 2 приведена также зависимость нормированной интенсивности отраженного света от времени при взрывном кипении смеси для $c_0=80\%$ и $dT/dt=213.4$ МК/с (буквами обозначены различные стадии взрывного кипения).

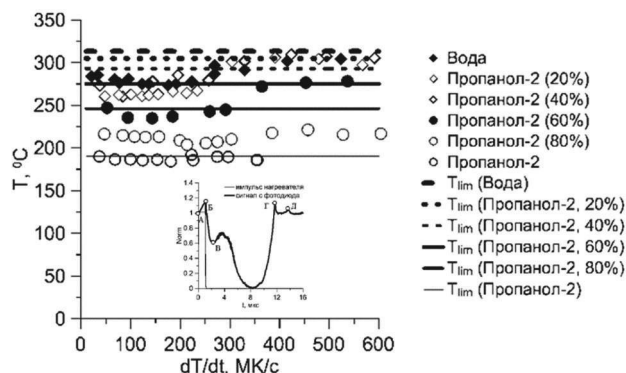


Рис. 2. Температура начала взрывного кипения бинарного раствора в зависимости от скорости роста температуры жидкости и динамика интенсивности отраженного света при концентрации спирта 80% и $dT/dt=213.4$ МК/с.

Список литературы:

1. Abramson A.R., Tien C.L. Recent Developments in Microscale Thermophysical Engineering // J. Microscale Thermophys. Eng. 1999. 3 (4). С. 229–244.
2. Allen R. R., Meyer J. D. and Knight W. R. Thermodynamics and Hydrodynamics of Thermal Ink Jets // Hewlett-Packard J. 1985. Vol. 36. P. 21–27.
3. Козулин И. А., Кузнецов В. В., Барткус Г. В. Экспериментальное изучение взрывного вскипания органических жидкостей методом изменения интенсивности лазерного излучения при рассеянии на микропузырьках // Журнал Вестник НГУ. Серия Физика. 2016. Т. 11 (1). С. 66–72.
4. Скрипов В. П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.

Исследование выполнено в ИТ СО РАН
за счет гранта Российского Научного Фонда
(проект №16-19-10519)

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА НА СУБЛИМАЦИЮ ОДИНОЧНОЙ ЧАСТИЦЫ ВЕТА-ДИКЕТОНАТА ХРОМА (III) В ПЕРЕГРЕТОЙ СМЕСИ ПАРА И ИНЕРТНОГО ГАЗА

Лебеда К.С.², Макаров М.С.^{1,2}, Макарова С.Н.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный технический университет НЭТИ,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

При создании новых типов авиационных и энергетических газовых турбин остро стоит вопрос о разработке новой технологии получения керамических термобарьерных покрытий на теплонапряжённых поверхностях лопаток турбин, жаровых труб камер сгорания. Перспективным методом получения термобарьерных покрытий является метод химического осаждения из газовой фазы с использованием паров металлоорганических соединений. Для реализации метода в технологических процессах необходимо обеспечить высокие скорости роста термобарьерного покрытия одновременно с высокой полнотой использования прекурсора. Этого можно достичь, подавая пары прекурсора в зону реакции и управляя смешением прекурсора и окислителя на покрываемой нагретой стенке. В этом случае парогазовая смесь паров прекурсора с газом-носителем формируются в отдельном устройстве – сублиматоре. Как правило, переход прекурсора в паровую фазу осуществляется в сублиматорах с горячими стенками в условиях интенсивного тепломассообмена [1-3]. Подача твёрдых частиц прекурсора в сублиматор осуществляется порциями, что обусловлено необходимостью дозирования прекурсора в реакционной зоне или получения композитных покрытий из разных исходных прекурсоров. Так холодные частицы из дозатора попадают в зону сублимации, в которой пары прекурсора находятся в перегретом, по отношению к частицам состоянии.

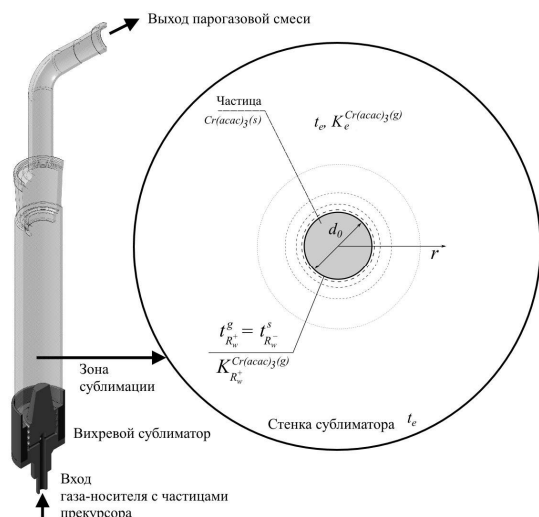


Рис. 1. Схема процесса сублимации частиц прекурсора в сублиматоре с горячими стенками.

В данной работе в сопряжённой постановке анализируются процессы тепломассообмена при сублимации (десублимации) сферических частиц ацетил-ацетоната хрома (III), как модельного соединения с известными свойствами, в среде перегретого пара

прекурсора смешанного с аргонном. На рис. 1 представлена схема процесса (слева), расчётная область и основные параметры задачи (справа). Более подробное описание метода решения задачи можно найти в работах [2, 4]. На рис. 2 представлены результаты расчётов интенсивности уноса массы с поверхности частицы в зависимости от времени её нахождения в зоне сублимации. Расчёты выполнены для частиц диаметром 4 мм с начальной температурой 28 °С, попадающих в смесь аргона с парами прекурсора при температуре 216 °С. Массовая концентрация паров принималась равной 0,001; 0,050 и 0,010.

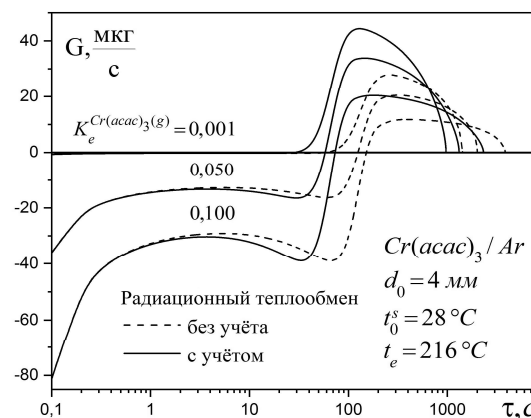


Рис. 2. Интенсивность уноса массы с поверхности частицы $Cr(acac)_3$ в зависимости от времени.

Как оказалось, важным фактором в таких системах является радиационный теплообмен, т. к. в несущей среде температура сублимирующих частиц ниже температуры этой среды, а для сублиматора с горячими стенками и ниже температуры его стенок. Показано, что время задержки сублимации и полное время жизни частицы, полученное с учётом радиационного теплообмена, почти вдвое меньше чем полученное без его учёта.

Список литературы:

1. Vahlas C., Caussat B., Senocq F. et al. A delivery system for precursor vapors based on sublimation in a fluidized bed // Chem. Vap. Deposition. 2007. V. 13. p. 123-129.
2. Игуменов И.К., Лукашов В.В., Макаров М.С., Макарова С.Н. Молекулярно-кинетические аспекты процессов парообразования летучих координационных соединений с органическими лигандами // ЖСХ. 2017. Т.58, №8, с. 1534-1542.
3. Abdrakhmanov R.Kh., Igumenov I.K., Lukashov V.V., Makarov M.S., Makarova S.N. Heat and mass transport at unsteady sublimation of single metal-organic particles in the gas-carrier flow // Proceedings of 13th HEFAT 2017. №728. 6 p.
4. Igumenov I.K., Makarov M.S., Makarova S.N. Influence of radiative heat transfer on the sublimation of a single chromium (III) and zirconium (IV) β -diketonate particle in the argon-helium gas mixture // IOP: JoP:CS. 2018. V. 1128. 012052. 6 p.

НЕСТАЦИОНАРНАЯ МОДЕЛЬ ПРИСТЕННОГО КИПЕНИЯ ПОТОКА НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

Левин А.А.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 130
Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Определение динамики кипения в пристенном слое жидкости является одной из актуальных задач, активно исследуемой в последние годы. Бурный рост мощности вычислительной техники, а также развитие коммерческих вычислительных пакетов позволяют вовлекать все большее число исследователей, в той или иной мере применяющих численные подходы к описанию теплообмена. Широкие возможности развития техники эксперимента, включая появляющиеся все более детализированные методики оптической диагностики, позволили заложить основу для верификации совершенствующихся методов численного моделирования. Благодаря этому возникла необходимость в существенно более точных предсказательных моделях, для описания ключевых параметров пузырькового кипения – геометрии паровой фазы, плотности центров нуклеации, необходимого перегрева поверхности и плотности теплового потока.

С одной стороны, наилучшие предсказания величины диаметра дают модели, основанные на эмпирических результатах, и выраженные через тепловые характеристики. Причем предсказания по величине температуры дают лучшие результаты, чем опирающиеся на тепловой поток. В немалой степени это объясняется существенной зависимостью размера пузыря от температуры поверхности. С другой стороны, обилие возможных условий, таких как теплофизические свойства жидкости и поверхности, приводит к большому диапазону возможного значения диаметра пузыря. В самом деле, одно только изменение давления жидкости приводит к кардинальному изменению геометрии пузыря. Различия же в теплофизических свойствах, характере тепловыделения, конвективной картины в масштабе зоны нуклеации могут приводить к большой вариативности поля температур. Таким образом, для общего случая необходимо детальные знания о распределении температур вблизи теплоотдающей поверхности.

В этой связи, нам кажется перспективным использование моделей, опирающихся на ключевые параметры, одним из которых является толщина перегретого слоя жидкости. Здесь можно упомянуть следующие работы [1–3], где уже были предприняты попытки описать динамику роста пузыря через определение его экстремального теплового баланса. Особенностью этого подхода является возможность ухода от определения механических характеристик, ставших популярными в последние годы, но не поз-

воляющих оценивать термическую картину в окрестности нуклеации.

Предсказание значения плотности центров парообразования, как показывают результаты анализа экспериментов с нестационарным тепловыделением на технической поверхности, успешно решается с применением подходов, опирающихся на общие знания о тепловом состоянии поверхности. Размер парового зародыша настолько мал, что его появление лишь косвенно зависит от уровня недогретости жидкости или характера тепловыделения. Таким образом, разработанные ранее и успешно применяющиеся зависимости для определения плотности центров парообразования могут быть распространены на нестационарные случаи кипения вплоть до уровней сопоставимости характерных размеров паровых зародышей и значимого градиента температур в жидкости.

Анализ влияния характеристик кипения (плотности центров парообразования, максимальный размер пузыря, частота нуклеации и др.) на перенос теплоты в пристенном слое жидкости показал, что наибольшее значение в этом процессе имеют три ключевых параметра: толщина перегретого слоя жидкости, температурный градиент вблизи изотермы насыщения, а также удельная площадь поверхности нагревателя, участвующая в пузырьковом кипении. Из этого вывода не следует принципиальная возможность исключать из рассмотрения вопрос о вычислении традиционных характеристик отдельного пузырька. В представляемом подходе эти величины (D_m , f_b etc) являются второстепенными, а поэтому зависят от тепловой картины кипения, и могут определяться с некоей допустимой погрешностью.

Список литературы:

1. Giustini, G., Ardron, K. H., & Walker, S. P. Modelling of bubble departure in flow boiling using equilibrium thermodynamics // International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 122, 2018, pp. 1085–1092.
2. N.H. Hoang, C.H. Song, I.C. Chu, D.J. Euh, A bubble dynamics-based model for wall heat flux partitioning during nucleate flow boiling // International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 112, 2017, pp. 454–464.
3. Levin, A. A., & Khan, P. V. Experimental observation of the maximum bubble diameter in non-stationary temperature field of sub-cooled boiling water flow // International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 124, 2018, pp.876–883.

Работа поддержана РФФ (грант № 19-19-00122)

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВО-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА**Маликов А.Г., Оришич А.М., Булина Н.В.**Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Алюминиево-литиевые сплавы обладают малой плотностью, повышенным модулем упругости и высокой прочностью по сравнению с обычными алюминиевыми сплавами. В последнее время возникает повышенный интерес к среднепрочным алюминиево-литиевым сплавам системы Al-Mg-Li, которые являются коррозионностойкими трещиностойкими, имеют чрезвычайно низкую плотность и обладают способностью надежно свариваться. Данные сплавы являются перспективными материалами для внедрения в авиакосмическую промышленность.

С целью замены технологии заклепочного соединения, широко применяемой в авиационно-космической технике, и снижения тем самым веса получаемых конструкций, активно разрабатываются технологии сварки алюминиево-литиевых сплавов различными способами: сварка трением с перемешиванием, лазерная сварка, гибридная лазерная сварка. Лазерная сварка обладает рядом преимуществ перед другими способами сварки. При данном способе сварной шов имеет малую ширину, а значит малую зону термического воздействия, наблюдается большая глубина проникновения луча в материал за счет большой плотности энергии. Высокая скорость процесса сварки, а также возможность автоматизации процесса делают этот метод наиболее перспективным. Однако, ограниченное число работ по исследованию сварных соединений сплавов системы Al-Mg-Li, показывает, что прочность сварных соединений получается низкая и составляет 0,67–0,8 от прочности основного сплава.

В работе приведены результаты исследования влияния процесса лазерной сварки и последующей термической обработки на фазовые переходы и прочностные характеристики алюминиево-литиевого образца сплава 1424. Сплав 1424 является одним из наиболее перспективных сплавов для создания сварного фюзеляжа аэробусов. Основой данного сплава является α -твердый раствор легирующих элементов в алюминии (α -Al), кроме этого присутствуют примесные фазы δ' (Al₃Li), S1(Al₂MgLi), а так же когерентные фазы интерметаллидов Al₃Sc и Al₃Zr.

Проведено исследование влияния постобработки сварных соединений с помощью процесса закалки и искусственного старения при различных режимах. Анализ проводился с привлечением таких методов как электронная сканирующая микроскопия, рентгеновская дифрактометрия и дифрактометрия синхротронного излучения.

Исследованы микро и нано структуры исходного сплава и шва после лазерной сварки и термообработки. Исходный сплав на микроуровне характеризуется цепочкой темных агломератов метастабильной фазы S1(Al₂MgLi), располагающихся преимущественно на границах дендритных зерен. Внутри дендритного

зерна исходного сплава хорошо видны частицы размером порядка 25–60 нм упрочняющей фазы δ' (Al₃Li) и 100–300 нм фазы S1(Al₂MgLi), которые равномерно распределены по объему.

Микроструктура сварного шва принципиально отличается. На границах и в объеме дендритных зерен формируется множество темных агломератов с характерным размером 0,5–1 мкм фазы S1(Al₂MgLi). В твердом растворе сварного шва частицы размером 25–60 нм упрочняющей фазы δ' (Al₃Li) отсутствуют, наблюдается незначительное количество частиц размером 100–300 нм фазы S1(Al₂MgLi). Прочность сварного шва составляет 0,75 от прочности основного сплава.

Применение процедуры закалки изменило микроструктура основного сплава, произошло значительное растворение метастабильной S1(Al₂MgLi) и частичное растворение упрочняющей фазы δ' (Al₃Li) внутри дендрита. В сварном шве в результате закалки зарегистрировано значительное растворение метастабильной фазы S1(Al₂MgLi). Упрочняющая фаза δ' (Al₃Li) в нем практически отсутствует. Легирующие компоненты, находящиеся в интерметаллидных фазах (в частности, в тройной фазе S1(Al₂MgLi)), полностью или частично растворялись в алюминии.

В результате закалки было сформировано предельно неравновесное состояние – пересыщенный твердый раствор легирующих элементов Mg и Li в алюминии. В сплаве и сварном шве удалось достичь выравнивания механических характеристик и получить максимальную гомогенизацию состава всего образца.

Применение процедуры искусственного старения позволило обеспечить выделение основной упрочняющей интерметаллидной фазы δ' (Al₃Li) как в шве, так и в сплаве. При этом локализация тройной фазы S1(Al₂MgLi) происходит на границе дендритных зерен, частично в шве и практически полностью в сплаве.

Таким образом, оптимизация процесса закалки при высоких температурах 490–550°C позволила создать во всем изделии (т.е. в шве и исходном сплаве) гомогенный перенасыщенный легирующими элементами твердый раствор, в котором в процессе старения эффективно формируется упрочняющая фаза δ' (Al₃Li), что обуславливает существенный рост прочностных характеристик до уровня основного сплава.

В результате впервые для сплава 1424 системы Al-Mg-Li достигнута прочность сварного шва на разрыв $\sigma_{\text{uts}}=500$ МПа после проведения термообработки в виде закалки и искусственного старения.

Работа поддержана РФФ (грант № 17-79-20139)

**НУКЛЕАЦИЯ ГИДРАТА МЕТАНА В ЭМУЛЬСИЯХ ВОДЫ В НЕФТЯХ:
РОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ, МАТЕРИАЛА СТенок СОСУДА И СВОЙСТВ НЕФТИ****Манаков А.Ю., Стопорев А.С., Сагидуллин А.К.**Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 3

В докладе будет представлен краткий обзор недавних работ лаборатории клатратных соединений ИНХ СО РАН, касающихся особенностей нуклеации газового гидрата метана в эмульсиях воды в нефти. Газовые гидраты – это соединения включения, в которых один сорт молекул (как правило, газообразных при нормальных условиях веществ) внедрен в полости каркаса из молекул воды. Одной из связанных с газовыми гидратами технологических проблем является образование гидратных пробок при протекании многофазных потоков нефть – попутный газ – пластовые воды в стволах скважин и в промысловых трубопроводах [1–4]. Общепринятый механизм образования гидратов в таких потоках включает (1) Образование эмульсий воды-в-нефти, (2) нуклеация гидрата на поверхности раздела вода – нефть и зарастание гидратной пленкой поверхности контакта, (3) рост гидратной оболочки «внутри» частицы, (4) агрегация образовавшихся частиц, приводящая к образованию гидратной пробки [1–4]. Анализ доступной литературы показывает, что стадия нуклеации гидрата на поверхности раздела вода – нефть в настоящее время наименее изучена, что и определило наш интерес к данной теме.

Были исследованы зависимости скоростей нуклеации гидрата от температуры, материала стенок реакционного сосуда и свойств нефти. Показано, что в интервале температур -3 – 5°C и при давлении около 12.5 МПа (переохлаждения 17.8 – 19.6°C) наблюдается сильная зависимость скорости нуклеации от температуры. Экспериментальные кривые выживания при этих условиях состоят из двух участков с разным наклоном к оси времени. Рассчитанные скорости нуклеации для начальных и конечных (в скобках) участков кривых выживания оказались равными $0.00064(0.00055)$, $0.00036(0.00017)$ и $0.00018(0.00010)$ сек $^{-1}$ м $^{-2}$ для температур -4.9 , -4.0 и -3.0°C , соответственно. На основании экстраполяции полученных данных показано, что при температурах выше 7°C нуклеация гидрата в данной системе вероятнее всего будет происходить с ничтожно малой скоростью, т.е. гидрат в этих условиях получить невозможно. Для изучения влияния материала стенок тигля на скорость нуклеации гидрата эксперименты проводились в тиглях, изготовленных из нержавеющей стали, стекла и тефлона. Рассчитанные скорости нуклеации оказались равными (приведены последовательно для экспериментов в тефлоновом, стеклянном и стальном тиглях): для нефти (1) 0.00381 , 0.00324 и 0.00514 мин $^{-1}$, для нефти (2) 0.00156 , 0.00202 и 0.00161 мин $^{-1}$, для нефти (3) 0.00186 , 0.00191 и 0.00195 мин $^{-1}$. На кривых выживания отчетливо прослеживались особенности (отклонения от линейности), которые могут быть обусловлены (а) многоста-

дийностью процесса нуклеации гидрата метана в изучаемых нефтях и (б) протеканием нуклеации на различных границах раздела. Анализ данных показал, что различие в наблюдаемых скоростях нуклеации для нефтей (1) и (2) значимо, и может быть связано только с различным материалом стенок тиглей. Влияние стенок тигля может быть вызвано несколькими причинами, либо их комбинацией: (а) различные материалы стенки тигля сами по себе обладают различной нуклеационной активностью, (б) на различных материалах имеются или образуются в ходе эксперимента отдельные участки, обладающие высокой нуклеационной активностью, (в) длина границы контакта, на которой происходит нуклеация, для разных материалов существенно различается. Наконец, результаты экспериментов по изучению нуклеации в эмульсиях воды в разных типах нефтей показали, что дисперсионная среда безусловно оказывает влияние на нуклеацию гидрата метана и льда в соответствующих эмульсиях, при этом влияние на нуклеацию оказывают как химический состав, так и физические свойства дисперсионной среды. Анализируя всю совокупность полученных результатов, мы пришли к выводу, что наиболее вероятным механизмом влияния среды на нуклеацию гидрата (льда) в эмульсиях может быть формирование адсорбционных оболочек на каплях эмульсии. За счет адсорбции компонентов дисперсионной фазы на имеющихся в системе поверхностях могут создаваться либо модифицироваться центры первичной нуклеации. С этим может быть связано более затрудненная нуклеация гидрата в декане по сравнению с близкими по плотности нефтями. Другая возможность – влияние адсорбционного слоя на вторичную нуклеацию. Кроме того, наши данные показывают, что в разных условиях в одной и той же дисперсионной среде образование твердых фаз может идти как по механизму «каждая капля – изолированный микрореактор», так и с явно выраженным протеканием вторичной нуклеации.

Список литературы:

1. Zerpa L.E. и др. Surface Chemistry and Gas Hydrates in Flow Assurance // Ind.Eng.Chem.Res. 2011. Т. 50. № 1. С. 188–197.
2. Sloan E.D. и др. State-of-the-Art Inside and Outside Flowlines // J.Petrol.Technology. 2009. Т. 61. №12. С. 89–94.
3. Sum A.K. и др. Developing a Comprehensive Understanding and Model of Hydrate in Multiphase Flow. From Laboratory Measurements to Field Applications // Energy&Fuels. 2012. Т.26. №7. С. 4046–4052.
4. Turner D.J. и др. Methane Hydrate Formation and an Inward Growing Shell Model in Water-in-Oil Dispersions // Chem. Eng. Sci. 2009. Т. 64. № 18. С. 3996–4004.

Работа поддержана грантом РФФ 17-17-01085

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПАРОВОЙ ПЛЕНКИ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ ПЛЕНОЧНОМ КИПЕНИИ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ

Пузина Ю.Ю., Крюков А.П., Ячевский И.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14

Знание закономерностей формирования стационарных пленок пара в различных условиях на поверхностях нагревателей важно как для фундаментальных исследований процессов переноса на межфазных поверхностях, так и для решения ряда прикладных задач. В частности, выяснение условий возникновения и развития паровой фазы при пленочном кипении сверхтекучего гелия необходимо для разработки мер, обеспечивающих надежное криостатирование сверхпроводящих магнитов, кабелей и других устройств, а также для обоснования способов, предотвращающих выход оборудования из строя.

Особая значимость этой научной проблемы связана с изучением динамики межфазной поверхности и процессов переноса без влияния силы тяжести. Кипение He-II реализуется только в пленочном режиме, а ограничения теплопереноса обусловлены процессами на межфазной поверхности. В условиях невесомости из-за отсутствия сил, препятствующих росту пленки, ее неограниченный рост делает невозможным детальное исследование процессов переноса на межфазной поверхности. В связи с этим представляет интерес пористая структура, которая, оставляя возможность для тепломассопереноса в жидкости, ограничивает неконтролируемый рост парового пространства. Это позволит изучить динамику межфазной поверхности и процессов переноса без влияния силы тяжести.

В настоящей работе проводится интерпретация экспериментальных данных по стационарному пленочному кипению сверхтекучего гелия (He-II) в различных условиях. Методика расчетов основана на известном подходе к расчету восстановительного теплового потока [1] и апробирована на экспериментальных данных по стационарному кипению сверхтекучего гелия на шаре [2].

Описание процессов теплопереноса основано на сочетании методов механики сплошных сред, молекулярно-кинетической теории и учета специфики сверхтекучего гелия. Распределение давления в жидкости обусловлено гидростатической разностью давлений. На границе раздела фаз формулируются универсальные условия совместности. Поток массы на границе раздела фаз равен нулю. Для нормальной компоненты тензора плотности потока импульса используется формула Лапласа. Теплота, поступающая на границу раздела фаз переносится в гелии-II согласно полумпирической теории Гортера-Меллинка. Давление пара в пленке определяется неравновесными эффектами в паре вблизи межфазной поверхности. Система уравнений замыкается уравнением теплового баланса.

Кипение гелия II в большом объеме может происходить как в шумовом, так и бесшумовом режиме в зависимости от глубины погружения нагревателя. В последнем случае на горячей поверхности форми-

руется гладкая устойчивая паровая пленка коаксиальная нагревателю [3]. Материалы съемки предоставляют возможность провести измерения толщины паровой пленки. Результаты сопоставления расчетов и экспериментальных данных показывают удовлетворительное количественное согласие.

Результаты экспериментов по росту паровой пленки при микрогравитации представлены в виде зависимости размера паровой пленки от времени [4]. Причем интересно, что при цилиндрической геометрии нагревателя, форма парового образования представляет собой идеальную сферу. В данном случае нагреватель представляет собой практически точечный источник теплоты. При этом стационарное состояние паровой пленки фактически определяется балансом между поверхностным натяжением и неравновесными эффектами в паре на границе раздела фаз. Ввиду фактического отсутствия силы тяжести гидростатическая разность давлений нивелируется. Результаты сопоставления расчетов и экспериментальных данных показывают удовлетворительное количественное согласие толщины паровой пленки в зависимости от тепловой нагрузки нагревателя.

В результате исследований пленочного кипения сверхтекучего гелия в стесненных условиях были получены данные о стационарной толщине паровой пленки [5]. При этом толщина паровой пленки не описывается закономерностями, следующими из подхода [1]. Очевидно, что здесь следует учитывать сопротивление пористой структуры, подобно тому, как это сделано в [6], что может позволить получить согласие результатов расчетов и экспериментов.

Таким образом, представленная в настоящей работе методика расчетов удовлетворительно описывает имеющиеся экспериментальные данные по стационарному пленочному кипению гелия-II.

Список литературы:

1. Kryukov A.P. and S.W. Van Sciver Calculation of the recovery heat flux film boiling in superfluid helium // *Cryogenics*. 1981. V. 21. N.9. P. 525–528.
2. Пузина Ю.Ю., Ковалев С.А., Кубриков К.Г. Стационарное состояние паровой пленки при взаимодействии горячего шара с недогретой жидкостью // *Вестник МЭИ*, 2013. №4. С.41–46.
3. Лабунцов Д.А., Аметистов Е.В., Спиридонов А.Г. Исследование пленочного режима кипения сверхтекучего гелия (He-II). // *Теплоэнергетика*. 1981, №4. С. 18–20.
4. Visualization of He II boiling process under the microgravity condition for 4.7 s by using a drop tower experiment / S. Takada, N. Kimura, S. Pietrowicz et al // *Cryogenics*, 2018, V.89, P.157–162.
5. P.V. Korolyov and I.A. Yachevsky An experiment on He-II film boiling inside the porous structure. // *Journal of Physics: Conf. Series* 1128 (2018) 012050.
6. Крюков А.П., Пузина Ю.Ю. Подавление колебаний границы раздела фаз пар – жидкость при кипении сверхтекучего гелия внутри пористого тела. // *ИФЖ*. Т. 86 (2013), №1. С. 24–30.

*Работа выполнена при поддержке Российского
Научного Фонда (проект №19-19-00321)*

РАЗЛОЖЕНИЕ ГИДРАТОВ МЕТАНА В ВОДНОЙ СРЕДЕ И В СРЕДЕ ГАЗООБРАЗНОГО МЕТАНА

Рожков А.Н.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
119526, Россия, Москва, пр. Вернадского, 101, корп. 1

Если давление и температура не отвечают условию фазовой устойчивости гидратов метана (метаногидратов), то метаногидраты разлагаются на воду и газообразный метан. В ходе предшествующих натурных исследований установлено, что в водной среде и в среде газообразного метана разложение протекает с разной скоростью: разложение метаногидрата в водной среде происходит значительно быстрее, чем в среде газообразного метана [1–3]. Установленная особенность разложения наблюдается как для монолитных метаногидратов (рис. 1), так и для метаногидратов в форме твёрдой пены (рис. 2).



Рис. 1. Монолитный гидрат метана в водной среде [1].

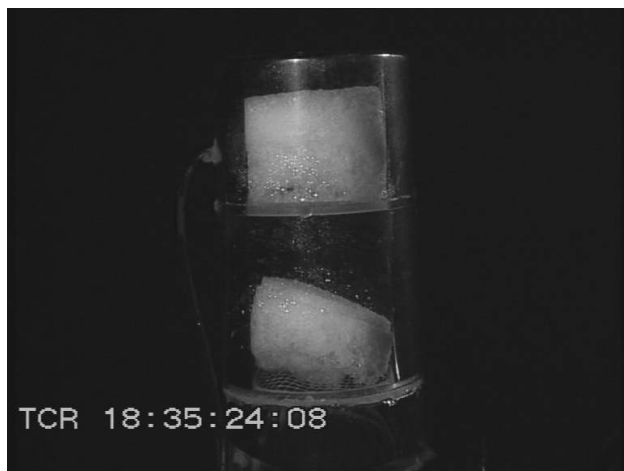


Рис. 2. Метаногидратная твёрдая пена в среде газообразного метана [1].

В настоящей работе предполагается, что влияние окружающей среды на разложение метанового гидрата обусловлено тем, что разложение протекает в трещинах гидрата, где имеются зародыши разложения. Представлена механическая модель замедления разложения метанового гидрата в среде газообразного метана, основанная на предположении о формировании ледяных пробок (пломб) в локальных зонах разложения гидрата – трещинах в метаногидрате. Ле-

дяная пробка (пломба) образуется в результате локального разложения метаногидрата в трещине на газ и воду, причём этот процесс протекает с потреблением тепла. Как следствие, вода замерзает и создаёт пробку (пломбу) в трещине, блокирующую разложение газового гидрата в трещине. Относительно низкая теплопроводность газообразного метана предохраняет ледяные пробки от быстрого таяния. Разложение гидрата (и соответствующее выделение метана) в заблокированной трещине продолжается до тех пор, пока давление метана в трещине не достигнет уровня, при котором метаногидрат становится устойчивым к разложению (например, ~38 МПа при +3.5°C). Теоретические оценки показывают, что прочность образовавшейся ледяной пробки достаточна для того, чтобы поддержать в трещине данное давление. Вместе с замерзанием воды происходит охлаждение газообразного метана, окружающего метаногидрат. Падение температуры газообразного метана наблюдалось в натурных условиях, причём, как для монолитных метаногидратов, так и для метаногидратов в форме твёрдой пены [1–3]. Установление температуры газообразного метана в окрестности метаногидрата управляется конкуренцией процессов формирования ледяных пробок, протекающих с потреблением тепла, и притока тепла к газообразному метану из внешних источников. Оказавшись в нормальных технических условиях, например, при подъёме метаногидратов на борт исследовательского судна, ледяные пробки тают, и заблокированный в трещинах газ взрывным образом вырывается в свободное пространство, генерируя при этом характерный щёлкающий шум, знакомый исследователям морских газовых гидратов.

С другой стороны, в метаногидрате, полностью погружённого в водную среду, образование ледяных пробок затруднительно в силу интенсивного притока тепла из окружающей водной среды. Пробки тают, не успев сформироваться.

Список литературы:

1. Егоров А.В., Нигматулин Р.И., Рожков А.Н., Черняев Е.С. Тепловые эффекты при транспорте глубоководных гидратов метана в негерметичном контейнере // Препринт ИПМех РАН № 1009. 2012. 25 с.
2. Egorov A.V., Nigmatulin R.I., Rozhkov A.N. Heat and mass transfer effects during displacement of deepwater methane hydrate to the surface of Lake Baikal // Geo-Marine Letters. 2016. V. 36 (3). P. 223–233.
3. Egorov A. V., Nigmatulin R.I., Rozhkov A.N. Temperature effects in deep-water gas hydrate foam // Heat and Mass Transfer. 2019. V. 55. № 2. P. 235–246.

Работа выполнена в рамках Программы
фундаментальных исследований Президиума РАН
№1.2.49 и государственного задания
№ АААА-А17-117021310375-7

ТАЯНИЕ ЛЬДА С УЧЕТОМ СЕЛЕКТИВНОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ

Слепцов С.Д.¹, Саввинова Н.А.², Гришин М.А.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Северо-восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
677000, Россия, Якутск, ул. Белинского, 58

В связи с освоением Арктики и угрозой глобального потепления прогноз состояния ледников и ледяных полей является актуальным. Моделирование таяния льда необходимо для понимания процессов, протекающих как в природе, так и для обеспечения безопасности строительных конструкций, техники и населения в северных широтах.

Постановки задач, моделирующие нагрев и последующее таяние льда, формулируются как задачи Стефана в полупрозрачной среде. Численные и экспериментальные исследования теплообмена в полупрозрачных средах с учетом теплового излучения при использовании двух и трехфазных постановок задачи Стефана широко описаны. Математическое моделирование радиационно-кондуктивного теплообмена с использованием однофазной постановки задачи Стефана рассматривалось в работе [1], но экспериментальных работ, где можно было бы сделать валидацию постановки и метод решения крайне мало.

Одной из них является расчетно-экспериментальная работа [2], где в климатической камере, при постоянной температуре 0 °С, на вертикальной, непрозрачной подложке находится лед под излучением от двух видов ламп. В математической модели процесса авторы проводили расчеты в однофазной постановке задачи Стефана. Они сравнивали темпы таяния и нагрева не облучаемой стороны льда и получили удовлетворительные согласования, используя подгоночные параметры и прямое интегрирование переноса излучения по закону Бугера. При этом авторами показано влияние коротковолнового излучения на появление сильно шероховатых поверхностей.

В данной работе представлена математическая модель экспериментальной части работы [2] для последующей валидации однофазной постановки задачи Стефана [1], учитывающее объемное селективное поглощение излучения слоем льда и селективный характер источника излучения.

Геометрическая схема задачи представляет собой слой чистого, нерассеивающего льда толщиной L_0 , который приклеен к подложке и находится в климатической камере с постоянной температурой T_∞ . На правую сторону льда, от лампы с температурой накала нити 3200 К, исходит излучение с постоянным падающим потоком. Диапазон излучения данной лампы приходится большей частью на участок спектра до 1.2 мкм, поэтому необходимо учесть селективность источника излучения.

Комплексная сопряженная задача состоит из двух этапов. На первом этапе рассматривается радиационно-кондуктивный теплообмен, продолжающийся до момента достижения правой границей льда температуры фазового перехода T_f . На втором этапе, с фиксированным значением T_f , рассматривается задача

Стефана, в котором возникающая тонкая пленка воды стекает под влиянием сил тяготения. Положение границ раздела фаз определяется из решения краевой задачи.

На рис. 1 представлен рост температуры на левой, не облучаемой поверхности льда со временем. Удовлетворительное согласие с экспериментом показывает точность математической модели.

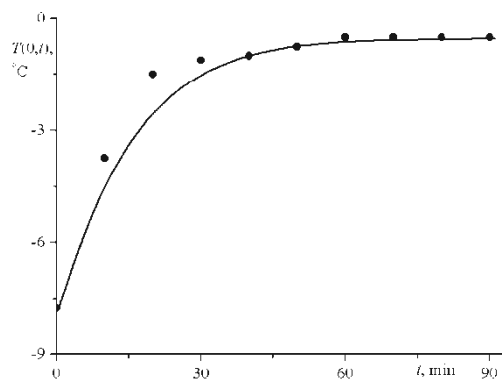


Рис. 1. Рост температуры левой границы со временем (линия – расчет, • – данные [2]).

В данной работе создана эффективная математическая модель этой задачи. Учтены селективный характер среды и источника излучения, опосредованно учтено появление шероховатости на льду при облучении галогеновой лампой. Сравнение расчетов темпа таяния льда и роста температуры на левой границе с экспериментом показывает хорошее согласие и, тем самым, создана валидация однофазной задачи Стефана в полупрозрачной среде.

Список литературы:

1. N. A. Rubtsov, N. A. Savvinova, and S. D. Sleptsov Simulation of the One-Phase Stefan Problem in a Layer of a Semitransparent Medium // J. Engng. Thermophysics. 2015. Vol. 24, No. 2. P. 123–138.
2. N. Seki, M. Sugawara, S. Fukusaki Radiative Melting of Ice Layer Adhering to a Vertical Surface // Wärme- und Stoffübertragung. 1979. Vol. 12. Iss. 2. P. 137–144.

Исследование части таяния льда выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (проект АААА-А17-117022850029-9), исследование РКТ выполнено РФФИ (проект № 18-48-140011 p_a)

**ПОЛУЧЕНИЕ ГИДРАТА ДИОКСИДА УГЛЕРОДА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
КОНДЕНСАЦИЕЙ СВЕРХЗВУКОВЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПУЧКОВ****Томин А.С.**Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 107а

Интерес к газовым гидратам обусловлен существованием огромных запасов углеводородного сырья на Земле в газогидратном виде и перспективой его использования как источника топлива, возможностью хранения и транспортировки газа в газогидратном состоянии, влиянием природных газовых гидратов на климат планеты [1]. Важное место в решении прикладных задач, связанных с газовыми гидратами, занимают усилия, направленные на предупреждение и ликвидацию техногенного гидратообразования в газодобывающем и газоперекачивающем оборудовании. Для утилизации парниковых газов предлагается перевод их в газогидратное состояние и захоронение на дне океана.

Аморфные конденсаты водно-газовой смеси получали в вакуумном криостате осаждением сверхзвуковых молекулярных пучков водяного пара и диоксида углерода на охлаждаемую жидким азотом подложку. Нагрев полученного образца приводит к его стеклованию (переход из твердого аморфного состояния в жидкое вязкотекучее) и последующей спонтанной кристаллизации. При соблюдении некоторых параметров, в результате кристаллизации образуется гидрат диоксида углерода. Для оптимизации динамики молекулярных пучков использовали сверхзвуковые сопла. Адиабатическое расширение разреженного пара на выходе из сопла приводит к понижению температуры пара и образованию кристаллических нанокластеров. Присутствие кристаллической фазы в аморфном конденсате существенно влияет на характер кристаллизации [2].

Методом низкотемпературного осаждения разреженного пара удастся получить широкий спектр веществ в стеклообразном состоянии. При отогревании бинарных стеклообразных смесей воды и таких газов, как метан, этан, пропан и диоксид углерода, удастся получить гидраты данных газов. В результате опытов с метаном, этаном и пропаном, было показано, что при осаждении сверхзвуковых пучков, в отличие от дозвуковых, удастся получить более высокую долю газа в гидрате. В представленной работе для аналогичного сравнения был выбран диоксид углерода – один из самых распространенных парниковых газов.

В ходе эксперимента вакуум в камере поддерживался не хуже 10–6 мм рт. ст. Откачкой паров азота понижали температуру подложки до 65 К и поддерживали во время осаждения не ниже 80 К. Для измерения получали образцы толщиной 100–150 мкм со скоростью осаждения ~100 мкм/ч. Температуру образца измеряли медь-константановой термопарой с погрешностью, не превышающей 0.5 К.

Для наблюдения за образцом использовался емкостный датчик, который позволяет определять температуру стеклования T_g и температуру кристаллизации T_c по изменению диэлектрических свойств осажденного на него конденсата. Непосредственно в опыте измеряли емкость C и тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ образца на частоте электрического поля 10 кГц в режиме непрерывного нагрева в вакууме со скоростью 0.05 К/с. Тепловые эффекты при кристаллизации регистрировались дифференциальной термопарой [3]. Доля газа определялась после извлечения из камеры полученного образца гидрата при его разложении в среде жидкого пентана.

Результаты предварительных опытов показали успешность примененного метода для получения гидрата диоксида углерода. Так же подтверждено предположение о возможности увеличения доли диоксида углерода в гидрате при сверхзвуковом осаждении. Полученные результаты могут быть полезны при решении задач по утилизации парниковых газов.

Список литературы:

1. Sloan E.D. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates // Nature 2003. № 426. P. 353–359.
2. Файзуллин М.З., Виноградов А.В., Томин А.С., Коверда В.П. Нестационарная нуклеация в слоях аморфного льда в присутствии искусственно внесенных кристаллических центров // Доклады Академии Наук. 2017. Т. 472. № 6. С. 645–649.
3. Faizullin M.Z., Vinogradov A.V., Koverda V.P. Formation of clathrate hydrates under crystallization of gas-saturated amorphous ice // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. V. 65, P. 649–654.

*Работа поддержана РФФИ
(грант № 18-38-00443 мол_а)*

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ НА ТЕПЛО-МАССОПЕРЕНОС ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ КРИСТАЛЛОВ

Федюшкин А.И.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
119526, Россия, Москва, пр. Вернадского 101/1

В данной работе приводятся результаты математического моделирования конвективного тепло-массопереноса при вибрационном воздействии при выращивании кристаллов методами Бриджмена, Чохральского и плавающей зоны. Рассмотрены управляемые гармонические вибрационные воздействия на расплав, создаваемые либо частью границы этого жидкого объема или погруженным в расплав вибратором, с учетом и без учета следующих факторов: излучения, вращения, гравитационной и термокапиллярной конвекции. Подробные постановки задач описаны в работах [1–2]. Показано влияние управляемых вибраций на толщину пограничных слоев в расплавах и на форму фронта кристаллизации при выращивании монокристаллов.

В работе показано, что вибрации могут интенсифицировать перемешивание, тепло-массоперенос в расплаве, а также выполаживать фронт кристаллизации, и уменьшать толщины пограничных слоев (динамического, температурного и концентрационного), что может приводить к увеличению температурного градиента на фронте кристаллизации и увеличению скорости роста кристаллов, что влияет на производительность и совершенство кристаллов.

На рис. 1 и рис. 2 показаны изотермы и профили температуры в расплаве NaNO_3 ($Pr=5.43$ – число Прандтля) (в правых частях рисунков – без вибраций, в левых – с вибрациями $Re_{vibr}=200$, где $Re_{vibr}=AfR/\nu$ – число Рейнольдса вибрационное, A – амплитуда, f – частота, ν – кинематическая вязкость, R – радиус кристалла).

На рис. 3 и рис. 4 показаны вертикальные профили температуры для метода Чохральского и зонной плавки с воздействием и без воздействия вибраций на расплав.

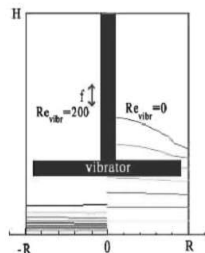


Рис. 1. Изотермы в расплаве $Re_{vibr}=200$ ($Pr=5.43$) (справа – без вибраций, слева – с вибрациями $Re_{vibr}=200$).

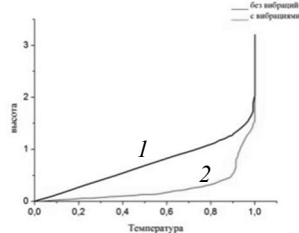


Рис. 2. Вертикальные профили температуры ($r=0.75$) в расплаве NaNO_3 ($Pr=5.43$) (линия 1 – без вибраций, 2 – с вибрациями $Re_{vibr}=200$).

Показано уменьшение толщин пограничных слоев для разных вариантов вибрационного воздействия, разных конфигураций расположения вибратора, свойств жидкостей, что подтверждает общую закономерность данного факта.

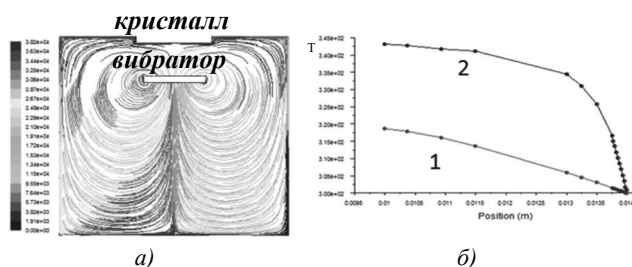


Рис. 3. Метод Чохральского ($A=0.4$ мм, $f=20$ Гц). а) треки течения расплава на момент $t=20$ сек. б) вертикальные профили температуры вдоль оси между кристаллом и вибратором (1 – без вибраций, 2 – с вибрациями).

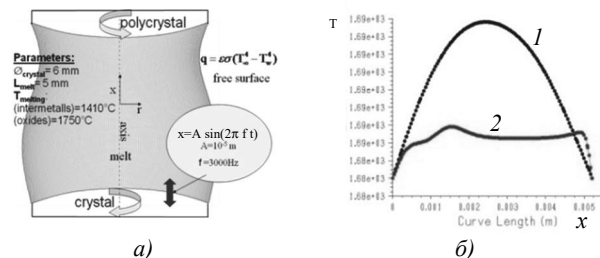


Рис. 4. Метод зонной плавки кремния ($A=0.01$ мм, $f=3000$ Гц), а) – схема модели. б) – вертикальные профили температуры ($r=0.5 R$) (1 – без вибраций, 2 – с вибрациями).

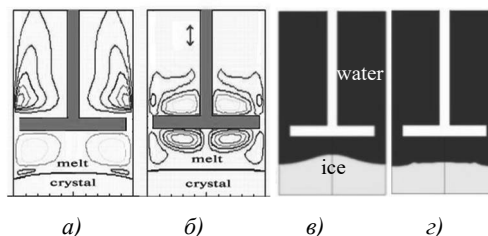


Рис. 5. Метод Бриджмена с погруженным вибратором (задача Стефана) а), б) функция тока (NaNO_3), а – $f=0$, б) с вибрациями ($A=0.1$ мм, $f=50$ Гц), в-г) граница раздела фаз вода-лёд, в) $f=0$, г) с вибрациями, ($A=0.1$ мм, $f=30$ Гц).

Результаты математического моделирования показали, что вибрационным воздействием, возможно, получить более плоский фронт кристаллизации (рис. 5).

Показано существенное влияние расположения и формы вибратора на распределение примеси не только в расплаве, но и в кристалле, которые необходимо учитывать при определении оптимальных вибрационных режимов для получения совершенных кристаллов.

Список литературы:

1. Федюшкин А.И., Иванов К.А. Гидродинамика и теплообмен при вибрационных воздействиях на расплав в процессах выращивания монокристаллов. – Препринт ИПМех РАН, № 1085, Москва, 2014, 107 с.
2. Feduyshkin Alexey, Bourago Nicolai, Polezhaev Vadim, Zharikov Evgenii, «The influence of vibration on hydrodynamics and heat-mass transfer during crystal growth», J. of Crystal Growth. 2005. V. 275. N. 1–2. P. e1557 – e1564.

ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСИ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ КРИСТАЛЛОВ

Федюшкин А.И.¹, Бураго Н.Г.¹, Пунтус А.А.²

¹ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 119526, Россия, Москва, пр. Вернадского 101/1

² Московский авиационный институт, 125993, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Данная работа посвящена численному исследованию влияния вращения тигля и погруженного нагревателя на распределение легирующего галлия в кристаллах германия, выращиваемых методом Бриджмена с погруженным нагревателем [1]. Нестационарное течение расплава описывается двумерными осесимметричными уравнениями Навье-Стокса для несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска:

$$\operatorname{div} \mathbf{U} = 0, \quad \rho_0 d\mathbf{u} / dt = -\partial p / \partial r + \mu (\Delta \mathbf{u} - \mathbf{u} / r^2),$$

$$\rho_0 dv / dt + \frac{\rho_0 uv}{r} = \mu (\Delta v - v / r^2),$$

$$\rho_0 dw / dt = -\partial p / \partial z + \mu \Delta w - \rho_0 g \beta T, \quad dT / dt = k_T \Delta T,$$

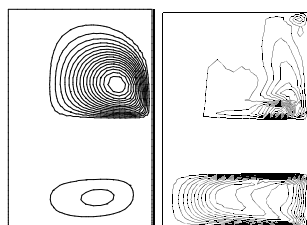
$$dC / dt = k_C \Delta C, \quad d / dt = \partial / \partial t + u \partial / \partial r + w \partial / \partial z$$

где использованы традиционные обозначения. Область решения показана на рис. 1, где $R=3.36$ см – радиус тигля, $\delta=0.1$ см – размер зазора (3), $h=0.8$ см, S_{SH} – область погруженного нагревателя (1). Отметим, что фронт кристаллизации (5) считается плоским и скорость роста кристалла считается постоянной V_s (порядка 1 см/час), $T_m=937^\circ\text{C}$ – температура плавления германия, C – концентрация примеси галлия. На твердых стенках заданы условия прилипания, Ω_{CR} – скорость вращения тигля (дно – кристалл (5) и вертикальные стенки тигля), Ω_b – скорость вращения погруженного нагревателя (1), μ , k_T , k_C – коэффициенты вязкости, теплопроводности и диффузии, β – коэффициент сил плавучести. На фронте кристаллизации ставится условие массообмена третьего рода с учетом скорости кристаллизации и с равновесным отеснением примеси. Подробнее постановка данной задачи и метод решения описаны в работе [1]. Влияние вращения погруженного нагревателя на картину линий тока расплава показано на рис. 2.



Рис. 1. Схема

расчетной области в 2D осесимметричной математической модели



а) б)

Рис. 2. Изолинии функции тока а) без вращения, б) с вращением погруженного нагревателя $\Omega_b = 0.3117$ rps.

Уравнения Навье-Стокса решались безматричным методом конечных элементов с кусочно-линейной аппроксимацией решения на треугольных конечных элементах и с коррекцией вязкости по методу Самарского.

Результаты моделирования представлены на рис. 2–4. На рис. 2 представлены изолинии функции тока для двух случаев: с вращением и без вращения погруженного нагревателя. Данные результаты показывают влияние вращения на характер течения в расплаве. Влияние вращений тигля и погруженного нагревателя на распределение примеси в кристалле показано в виде изолиний концентраций на рис. 3–4.

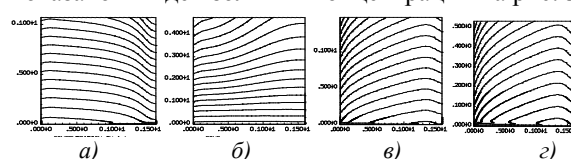


Рис. 3. Изолинии концентрации примеси в кристалле без вращений тигля и погруженного нагревателя для земных условий (а) и невесомости (б).

Влияние вращения погруженного нагревателя $\Omega_b=0.05$ rps для земных условий (в) и невесомости (г)

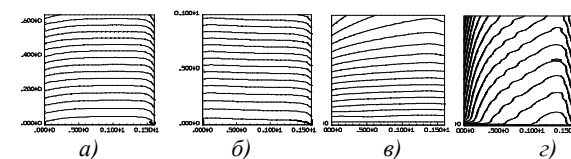


Рис. 4. Изолинии концентрации примеси в кристалле при вращении тигля и погруженного нагревателя в земных условиях: а) $\Omega_b = 0.05$ rps, $\Omega_c = 0.3117$ rps;

б) $\Omega_b = -0.05$ rps, $\Omega_c = 0.3117$ rps;

в-г) $\Omega_b = 0.05$ rps при осциллирующем вращении нагревателя с частотой 0.68 Гц для двух моментов времени $t=579$ с (в) и $t=816$ с (г).

Результаты моделирования показывают, что в земных условиях наиболее однородное распределение примеси в кристалле получается при противовращении тигля и погруженного нагревателя (рис. 4б).

Влияние гармонического осциллирующего вращения погруженного нагревателя было рассчитано с частотой 0.68 Гц. Это влияние, выражается в появлении дополнительных неоднородностей в распределении примеси рис. 4 в–г.

Список литературы:

1. Feduyshkin Alexey, Bourago Nicolai, Polezhaev Vadim, Zharikov Evgenii, «The influence of vibration on hydrodynamics and heat-mass transfer during crystal growth», J. of Crystal Growth. 2005. V. 275. No. 1–2. P. e1557 – e1564.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРОВОГО ПУЗЫРЬКА,
ИНДУЦИРОВАННОГО ЛАЗЕРНЫМ НАГРЕВОМ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ****Чернов А.А.^{1,4}, Левин А.А.^{2,4}, Чудновский В.М.^{3,4}**¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 130³ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН
690041, Россия, г. Владивосток, Балтийская, 43⁴ Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

На данный момент времени лазерный источник энергии для нагрева различных веществ, в том числе биологических тканей и жидкостей, находит широкое применение в различного рода практических задачах и приложениях. Одним из основных достоинств такого метода является высокая интенсивность теплового воздействия, преимущественно локализованного, а также достаточно хорошая степень контролируемости. Кроме того, технологии, в основе которых лежит лазерно-индуцированное воздействие на вещество, отличаются и высокой энергоэффективностью. Так, при прохождении излучения через оптоволокно с площадью $0,1 \text{ мм}^2$ удельная плотность теплового потока достигает значения 10 МВт/м^2 при мощности источника 1 Вт.

В последние годы отмечается все возрастающий интерес применения лазерно-индуцированного воздействия на биологические ткани [1–3]. Это обусловлено тем, что оптоволоконный нагревательный элемент удобно использовать в эндоскопических и пункционных хирургических вмешательствах, которые на данный момент времени являются наиболее безопасными и перспективными. Суть этого воздействия заключается в следующем. Лазерное излучение подается через оптоволокно, которое контактирует с биологическими тканями, либо с биологическими жидкостями (кровью, лимфой, жидким содержимым кист и др.). Иницируется взрывное вскипание. Так как жидкость существенно недогрета (по крайней мере, основная ее часть), кипение сопровождается не только ростом, но и коллапсом парогазовых пузырьков с формированием горячих затопленных струй. Этими струями и осуществляется деструктивное воздействие на патологические образования.

Характерной особенностью процессов фазовых превращений в описанном методе являются следующие: характерные времена эволюции парогазового

пузырька не превышают 1 мс; жидкость существенно недогрета до температуры насыщения; в ней присутствуют растворенные газы (углекислый газ, азот и кислород) и поверхностно-активные вещества. Таким образом, постановка задачи моделирования эволюции паровой фазы в биологической жидкости при условии интенсивного энергетического воздействия лазерным источником умеренной мощности отличается от рассмотренных ранее.

В настоящей работе исследуется процесс образования, роста и схлопывания парового пузырька, индуцированного локальным лазерным нагревом существенно недогретой жидкости (вблизи торца оптоволоконка). Источником излучения служит лазер мощностью 3 Вт с длиной волны 1,9 мкм (данное излучение поглощается жидкостью). Сформулирована математическая модель процесса, найдены основные определяющие его критерии. Реализована численная схема теплообмена в перегретом объеме жидкости. Детально описана эволюция формирующегося в результате воздействия парогазового пузырька. Результаты численного анализа сопоставлены с данными скоростной видеосъемки. Показано их хорошее соответствие.

Список литературы:

1. J. P. Padilla-Martinez, C. Berrospe-Rodriguez, G. Aguilar, J. C. Ramirez-San-Juan, and R. Ramos-Garcia. Optic cavitation with CW lasers // A review Physics of Fluids. 2014. 26. 122007.
2. Mohamad Feras Marqa, Serge Mordon, Nacim Betrouni. Laser interstitial thermotherapy of small breast fibroadenomas: Numerical simulations // Lasers in Surgery and Medicine. 2012. V. 44. Issue 10. p. 832–839.
3. Yusupov V.I., Chudnovskii V.M. and Bagratashvili V.N. Laser-induced hydrodynamics in water-saturated biotissues: 2. Effect on delivery fiber // Laser Phys. 2011. № 21(7): P. 1230–1234.

Работа поддержана РФФ, грант № 19-19-00122



СЕКЦИЯ 4

Гидрогазодинамика реагирующих сред, детонационные процессы



ЭВОЛЮЦИЯ ОБЛАКА ЖИДКО-КАПЕЛЬНОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ ОСАЖДЕНИИ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СРЕДЕ

Архипов В.А.¹, Булавко А.М.², Жарова И.К.¹, Маслов Е.А.¹, Перфильева К.Г.¹, Ткаченко А.С.³

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

² Главное управление МЧС России по Томской области, 634057, Россия, Томск, пр. Мира, 26

³ Томский государственный педагогический университет, 634061, Россия, Томск, ул. Киевская, 60

Одним из распространенных способов тушения крупных пожаров, особенно в труднодоступных районах, является сброс хладагента (как правило, воды) в очаг пожара с борта самолета или вертолета с помощью специальных шлюзовых систем. Для повышения эффективности технологии авиационного пожаротушения необходимо моделирование следующих процессов:

- разрушение макрообъема жидкости, сбрасываемого из водосливного устройства летательного аппарата, с образованием первичного облака полидисперсных капель [1];
- эволюция аэрозольного облака при его гравитационном осаждении [2];
- взаимодействие жидко-капельного облака с очагом пожара [3].

В настоящем сообщении представлена математическая модель эволюции облака полидисперсного жидко-капельного аэрозоля при его гравитационном осаждении в очаг пожара. Динамика облака рассматривается как движение капель каждой фракции с учетом силы и направления ветра, а также восходящего потока из очага пожара.

При определении коэффициента аэродинамического сопротивления рассматриваются стоксовский, переходный и автомоделный режимы обтекания капли. В процессе эволюции жидко-капельного облака учитывается теплообмен капель с окружающей средой и изменение их размеров за счет испарения. При осаждении учитываются процессы дробления капель. В рамках указанных положений динамика жидко-капельного облака при авиационном пожаротушении в декартовой системе координат описывается системой уравнений, включающей уравнения движения капли, конвективного теплообмена капли с окружающей средой (воздухом) и уравнение изменения размера капли вследствие испарения.

При движении капли в математической модели предусматривается возможность нарушения целостности капли и ее неоднократного дробления. Условиями дробления являются критические соотношения, характеризующие взаимодействия двух типов:

- внутреннее взаимодействие – массовые инерционные силы преобладают над силами поверхностного натяжения капли (неустойчивость Рэлея – Тейлора);
- внешнее взаимодействие – силы лобового сопротивления превышают силы поверхностного натяжения капли (неустойчивость Кельвина – Гельмгольца).

В качестве критерия дробления капель за счет неустойчивости Рэлея – Тейлора принимается критиче-

ское значение числа Бонда, за счет неустойчивости Кельвина – Гельмгольца – критическое значение числа Вебера. Дробление капель учитывается путем расчета значений чисел Бонда и Вебера. Предполагалось, что при достижении критических значений числа Бонда $Bo_* = 90$ или числа Вебера $We_* = 17$ капля дробится на две сферические капли равной массы.

При выбросе в атмосферу сравнительно большого количества жидкости в результате спонтанного дробления отдельных неустойчивых объемов и капель жидкости образуется первичное облако капель с дифференциальной функцией счетного распределения

$$f(r) = a \exp(-3.12r),$$

где $a = 1.575 \text{ мм}^{-1}$ – нормирующий множитель; r – текущий радиус капель (мм).

При проведении расчетов рассматривались шесть фракций капель одинакового радиуса в диапазоне $r = (0.5 \div 3.0) \text{ мм}$.

Проведена оценка применения одного из способов локализации лесного пожара с помощью авиации, состоящего в создании перед фронтом пламени полосы орошения, препятствующей дальнейшему его распространению. Основные требования: ширина создаваемой полосы орошения должна быть не менее $(8 \div 10) \text{ м}$, плотность покрытия влагой – не менее 0.8 кг/м^2 . Показано, что увеличение скорости ветра способствует образованию более широкой полосы орошения. При этом массовая концентрация воды на полосе орошения уменьшается, и при скорости ветра более 10 м/с плотность покрытия влагой недостаточна для создания эффективного препятствия распространению пламени.

С использованием предложенной модели [2] проведено численное исследование характеристик полосы орошения для локализации лесного пожара при сбросе хладагента из водосливного устройства ВСУ-5, установленного на вертолете.

Список литературы:

1. Накоряков В.Е., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. О предельных поперечных размерах капельного облака при разрушении водяного массива в процессе падения с большой высоты // Доклады Академии наук. 2017. Т. 475. № 2. С. 145–149.
2. Ткаченко А.С., Маслов Е.А., Усанина А.С., Орлов С.Е. Программа расчета жидкокапельного аэрозольного облака. Программа для ЭВМ № 2016610567. Оpubл. 14.01.2016.
3. Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Тепломассоперенос при движении капель воды в высокотемпературной газовой среде // Инженерно-физический журнал. 2013. Т. 86. № 1. С. 59–65.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10014)

ДИФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ ГАЗОВОЙ СТРУИ НА ПРЕГРАДЕ ИЗ ВЫСОКОПРОНИЦАЕМОГО ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА

Баев В.К., Бажайкин А.Н.

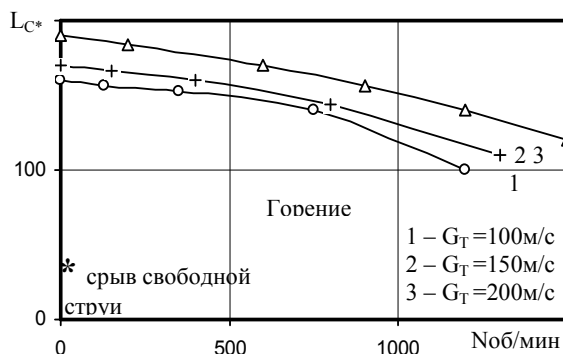
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН, Новосибирск

e-mail: bazhan@itam.nsc.ru

Относительно простым и мало затратным способом организации процессов тепло и массообмена, смешения и горения является струйная обдувка преград, которая применяется на практике и хорошо изучена, особенно в случае непроницаемых преград [1]. Использование преград из проницаемых для газов пористых материалов открывают более широкие возможности их практического использования, однако структура течений и полезные эффекты, возникающие при натекании струй на такие преграды, остаются малоизученными. В [2] показано, что при взаимодействии струи углекислого газа с неподвижной проницаемой преградой образуются течения по поверхности, внутри и позади нее, течение, циркулирующее между соплом и преградой, а при вращении преграды (диска) образуется течение из его цилиндрической поверхности.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований взаимодействия горящей струи пропан-бутана с неподвижной и вращающейся преградой из высокопроницаемого ячеисто пористого материала (ВПЯМ) на основе никеля. Струя впрыскивалась из цилиндрического сопла диаметром $d=0,5$ мм со скоростями $U_0=100$ – 200 м/с на преграду, установленную на расстоянии $l_c=50$ – 100 мм от сопла. Преграда (диск) имела диаметр 150 мм, толщину 20 мм, пористость 95%, размер ячеек 2–4 мм. Исследования показали устойчивое горение при натекании струи на неподвижный диск с нагревом его поверхностей до 1000°C . Горение на вращающемся диске сопровождалось образованием на его лицевой, тыльной и цилиндрической поверхностях кольцевых областей, разогретых до 800°C , причем устойчивость горения зависела от U_0 , l_c и частоты вращения диска N . На рисунке показаны зависимости относительных расстояний, при которых происходил срыв (прекращение) горения $L_{c*}=l_c*/d$ от N , откуда видно, что с ростом N значения L_{c*} уменьшаются практически линейно.

Каждая из полученных кривых ограничивает сверху область устойчивого горения для заданной скорости струи U_0 , с повышением которой размеры этой области



Зависимость относительного расстояния от сопла до диска (L_{c*}), при которой происходит срыв горения, от скорости вращения диска N .

расширяются. На рисунке, для сравнения, приведены данные по срыву свободной (без преграды) струи пропан-бутана, где точка (*) соответствует $U_0=30$ м/с, которая существенно ниже значений U_0 , когда струя горит на преграде. Таким образом, условия, в которых реализуется устойчивое горение струи на проницаемом диске, определяются скоростью истечения струи, расстоянием от сопла до диска и его скоростью вращения. Температурные измерения и газовый анализ показали существование оптимальных режимов горения с максимальными температурами продуктов сгорания и нагрева диска при различных его скоростях вращения и расходах топлива.

Эксперименты с горячей топливной струей показали возможность применения проницаемого диска в качестве горелочного устройства для получения тепла от его раскаленных поверхностей и продуктов сгорания.

Список литературы

1. Chander S., Ray A. Flame impingement heat transfer: A review // Energy conversion and management. 46. 2005. P. 2803–2837.
2. Баев В.К., Бажайкин А.Н. Взаимодействие газовой струи с неподвижной и вращающейся преградой из высокопроницаемого пористого материала // ЖТФ. 2018. Том 88. С.1642–1647.

ДИНАМИКА ОСАЖДЕНИЯ КЛАСТЕРА ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Поленчук С.Н.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

Закономерности движения консолидированной системы частиц дисперсной фазы (твердых частиц, капель, пузырьков) относятся к фундаментальным проблемам классической гидродинамики и механики двухфазных потоков [1]. Процесс осаждения кластера твердых частиц в поле силы тяжести зависит от ряда параметров – размера и формы частиц, физико-химических свойств жидкости и твердых частиц, начальной концентрации частиц в облаке, режима движения [2]. На закономерности осаждения совокупности частиц также влияют способ введения частиц в жидкость. В работе [3] предложена установка и методика для исследования осаждения кластера монодисперсных твердых частиц в вязкой жидкости. Методика основана на введении совокупности монодисперсных твердых частиц в жидкость двумя способами, обеспечивающими движение частиц в режимах продуваемого, непродуваемого и частично продуваемого облака.

В настоящей работе представлен модифицированный метод исследования гравитационного осаждения кластера полидисперсных твердых частиц в вязкой жидкости [4].

Для проведения исследований по гравитационному осаждению полидисперсных твердых частиц использовали экспериментальную установку (рис. 1). Установка работает следующим образом. Контейнер 1 с частицами 3 размещают в кювете 6 с вязкой жидкостью 7. Через патрубок 8 с вентилем 9 вводят в контейнер воду из емкости 10. После полного заполнения контейнера излишек воды вытесняют через дренажную трубку 11.

Перемешивание частиц 3 с водой в контейнере проводят воздействием ультразвуковых колебаний генератора 12 типа УЗГМ-10-22МС. В процессе перемешивания постепенно вытесняют воду вязкой жидкостью, подаваемой в контейнер из емкости 13 через вентиль 14 и патрубок 15. Излишек вязкой жидкости вытесняется из контейнера через дренажную трубку 11. После полного замещения воды вязкой жидкостью открывают контейнер поворотом подвижной оболочки 2 вокруг оси 5.

Визуализацию процесса осаждения облака частиц проводят с использованием съемки через прозрачные стенки кюветы 6 двумя скоростными цифровыми видеокамерами 4 типа Citius C 100 в двух ракурсах с темпом съемки (50÷100) кадров в секунду. Обработку видеорядов проводят с использованием компьютера, на который поступает информация с видеокамер. По результатам обработки определяют закономерности эволюции формы облака, изменение его объема, концентрации частиц в облаке, скорости движения центра масс облака и коэффициент сопротивления облака частиц.

В качестве жидкости использовали силиконовое масло ПМС-10000. В экспериментах использовали стальные шарики в диапазоне размеров $D_p=(1÷3)$ мм.

За счет изменения диаметра контейнера, количество фракций частиц, диаметра и количества частиц каждой из фракций можно варьировать начальную концентрацию частиц в широком диапазоне.

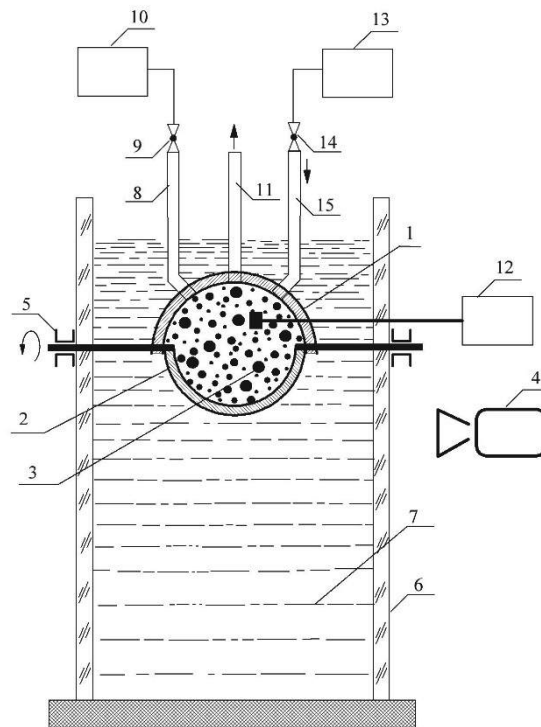


Рис. 1. Схема установки для исследования процесса осаждения облака частиц.

Экспериментально получены видеокдры гравитационного осаждения кластера полидисперсных твердых сферических частиц. Получена эмпирическая зависимость для коэффициента сопротивления кластера полидисперсных твердых сферических частиц в зависимости от начальной концентрации частиц в облаке.

Список литературы:

1. Гидродинамика, массо- и теплообмен в дисперсных системах / Броунштейн Б.И. Л.: Химия, 1977. 279 с.
2. Хоргуани В.Г. О характере и скорости падения системы частиц одинаковых размеров // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1966. Т. 2. № 4. С. 394–401.
3. Архипов В.А., Усанина А.С. Режимы осаждения консолидированной системы твердых сферических частиц // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2017. № 5. С. 74–85.
4. Заявка на патент РФ № 2018142185 с приоритетом от 29.11.2018. Способ исследования осаждения сферического облака полидисперсных твердых частиц в вязкой жидкости, МПК G01N 21/85 / В.А. Архипов, С.А. Басалаев, К.Г. Перфильева, Е.А. Маслов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10014)

НЕПРЕРЫВНАЯ ДЕТОНАЦИЯ СМЕСЕЙ CH_4/H_2 -ВОЗДУХ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ГЕОМЕТРИИ КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

e-mail: zhdan@hydro.nsc.ru

Современное состояние исследований непрерывной спиновой детонации (НСД) ряда топливовоздушных смесей (ТВС) с горючим ацетилен, водород и синтез-газ в проточных кольцевых камерах сгорания (КС) представлено в обзоре [1]. Первые экспериментальные данные по реализации НСД в кольцевой цилиндрической КС диаметром 503 мм (ДК-500) трудно детонирующих ТВС метан/водород – воздух с массовыми долями H_2 в горючем $m_{\text{H}} = 1/5 \div 1/2$ приведены в [2]. Цель настоящей работы – для смесей CH_4/H_2 – воздух при $m_{\text{H}} = 0 \div 1/5$ исследовать влияние геометрии КС на область реализации НСД при уменьшении доли водорода в смеси. Эксперименты проведены в ДК-500 наружным диаметром цилиндрической стенки $d_{\text{c1}} = 503$ мм (кольцевая щель для подачи воздуха шириной $\delta = 10$ мм и площадью сечения $S_{\delta} = \pi(d_{\text{c1}} - \delta) \cdot \delta = 155 \text{ см}^2$, кольцевой зазор между стенками КС $\Delta = 58$ мм, длина $L_{\text{с}} = 780$ мм). Расход воздуха изменялся в диапазоне $G_a = 1.88 \div 23.5$ кг/с, а коэффициент избытка горючего $\phi = 0.78 \div 1.78$. В опытах с помощью дисковых перегородок двух диаметров $d_{\text{ex}} = 440$ и 467 мм варьировалась площадь сечения $S_{\text{ex}} = \pi(d_{\text{c1}} - \Delta_{\text{ex}}) \cdot \Delta_{\text{ex}}$ на выходе из КС ($K_{\text{ex}} = S_{\text{ex}}/S_{\delta} = 1.77 \div 5.23$). Истечение продуктов происходило в окружающую атмосферу с давлением $p_a = 10^5$ Па.

Результаты экспериментов. Для составов бинарного горючего $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2$, $\text{CH}_4 + \text{H}_2$ и $\text{CH}_4 + 0.5\text{H}_2$ при уменьшении геометрического параметра K_{ex} на выходе из КС получены следующие результаты.

Горючее $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2$. Для $K_{\text{ex}} = 5.23$ в диапазоне расходов воздуха $G_a = 7 \div 14$ кг/с и $\phi = 0.93 \div 1.57$ получен пульсирующий режим с частотой пульсаций $f \approx 0.1 \div 0.2$ кГц.

Для $K_{\text{ex}} = 3$ впервые были осуществлены режимы НСД: при $G_a = 5.1 \div 23.5$ кг/с и $\phi = 0.91 \div 1.36$ – двухволновой ($n = 2$) с частотой вращения перечных детонационных волн (ПДВ) $f = 1.36 \div 1.65$ кГц; при $G_a = 3.3 \div 5.1$ кг/с и $\phi = 1.36 \div 1.5$ – одноволновой ($n = 1$) с $f = 0.7 \div 0.72$ кГц.

Для $K_{\text{ex}} = 1.77$, $G_a = 2 \div 20.8$ кг/с и $\phi = 1.01 \div 1.78$ реализованы только двухволновые режимы НСД ($f = 1.21 \div 1.34$ кГц). Фрагмент типичной фоторегистрограммы НСД приведен на рис. 1.



Рис. 1. Фрагмент фоторегистрограммы ПДВ в смеси $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2$ -воздух с $K_{\text{ex}} = 1.77$ ($G_a = 20.8$ кг/с, $\phi = 1.01$, $n = 2$, $f = 1.34$ кГц, $D = 1.06$ км/с).

Горючее $\text{CH}_4 + \text{H}_2$. Для данной горючей смеси реализованы как одноволновые, так и двухволновые режимы НСД.

При $K_{\text{ex}} = 3$ одноволновые режимы НСД наблюдали в двух диапазонах расхода воздуха: $G_a = 7.9 \div 20$ кг/с ($\phi = 1.12 \div 1.2$, $f = 0.62 \div 0.73$ кГц) и $G_a = 1.9 \div 2.56$ кг/с ($\phi = 97 \div 1.01$, $f = 0.65 \div 0.68$ кГц). В диапазоне $G_a = 2.56 \div 7.9$ кг/с ($\phi = 1.01 \div 1.12$ и $f = 1.2 \div 1.35$ кГц) существовал двухволновый режим НСД.

При $K_{\text{ex}} = 1.77$, $G_a = 1.95 \div 23.45$ кг/с и $\phi = 0.78 \div 0.99$ наблюдали только двухволновые режимы НСД ($f = 1.19 \div 1.34$ кГц).

Горючее $\text{CH}_4 + 0.5\text{H}_2$. В этой смеси с массовой долей водорода в горючем 6 % для $K_{\text{ex}} = 3$ и $K_{\text{ex}} = 1.77$ также впервые реализованы одноволновые и двухволновые режимы НСД.

При $K_{\text{ex}} = 3$ одноволновые режимы наблюдали в двух диапазонах расхода воздуха: $G_a = 14.8 \div 19.6$ кг/с ($\phi = 0.89 \div 0.92$, $f = 0.55 \div 0.6$ кГц) и $G_a = 1.88 \div 2.28$ кг/с ($\phi = 1.03$, $f = 0.62 \div 0.66$ кГц). В диапазоне $G_a = 2.28 \div 6.84$ кг/с ($\phi = 0.98 \div 1.03$ и $f = 1.2 \div 1.35$ кГц) существовал двухволновой режим НСД. Также наблюдали горение в диапазоне $G_a = 6.84 \div 14.8$ кг/с ($\phi = 0.92 \div 0.98$).

При $K_{\text{ex}} = 1.77$ и $G_a = 2.9 \div 17.6$ кг/с ($\phi = 0.88 \div 0.99$, $f = 1.21 \div 1.29$ кГц) наблюдали двухволновые режимы НСД. При малых расходах воздуха $G_a = 1.95 \div 2.9$ кг/с ($\phi = 0.99 \div 1.0$) существовало обычное горение. Установлено, что с уменьшением доли H_2 в бинарном горючем область реализации НСД по расходу смеси сужается.

Регистрация в экспериментах статического $p_{\text{с3}}$ и полного давления $p_{\text{с30}}$ на выходе из КС позволила определять тяги и удельные импульсы при НСД.

Итак, в ДК-500 для бинарных горючих CH_4/H_2 ($m_{\text{H}} = 0 \div 1/5$) установлено, что при уменьшении (в 3 раза) площади выходного сечения кольцевой КС происходит сдвиг нижней границы реализации режимов непрерывной детонации в область меньших концентраций водорода $0 < m_{\text{H}} < 1/17$.

Список литературы:

1. Быковский Ф.А., Ждан С.А. Современное состояние исследований непрерывной детонации топливовоздушных смесей (обзор). Физика горения и взрыва. – 2015. – Т. 51. № 1. – С. 31–46.
2. Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. Непрерывная детонация смесей метан/водород – воздух в кольцевой цилиндрической камере // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54, №4, с. 96–106.

Работа поддержана РФФИ (грант № 19-01-00270а)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАКРУЧЕННЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ РЕАГИРУЮЩИХ СТРУЙ

Евдокимов О.А., Гурьянов А.И., Калинина К.Л.

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева,
152934, Россия, Рыбинск, ул. Пушкина, 53

Перспективным способом организации струйного потока является комбинированное закрученное течение. Такие течения представляют собой двухкомпонентные газовые или газожидкостные потоки, в которых осевой компонент, как правило, является струйным, а на периферии относительно него распространяется закрученный поток. При решении задач горения в роли осевого потока, как правило, выступает газообразное топливо, реагирующее с окислителем в составе спутного воздушного периферийного потока с различными значениями параметра закрутки. Это позволяет существенным образом интенсифицировать процесс горения за счет повышения массовой скорости химических реакций.

Экспериментальные и расчетные исследования показывают [1], что структура комбинированных закрученных реагирующих течений претерпевает существенные изменения при варьировании ряда факторов, таких как параметр закрутки, внешние воздействия, в том числе свободная конвекция и др. (рис. 1). Отмеченное определяет как динамику процесса выгорания топлива в струе, так и ее интегральные характеристики, к которым следует отнести относительную протяженность зоны реакции, среднюю скорость горения, площадь поверхности фронта пламени.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что в отличие от горения одиночной топливной струи, формирование факела в условиях комбинированного течения сопровождается уменьшением относительной криволинейной длины пламени на 30% в диапазоне углов между направлениями подъемной силы и начальным импульсом истечения $0 < \varphi < 90^\circ$. Установлен характер зависимости осредненной по времени массовой скорости выгорания U от числа Рейнольдса ограничивающей закрученной воздушной струи при значениях $\varphi = 0$ и $Re_{топл} = 4000$, выраженный наличием области автомодельности ($Re_{возд} < 1500$), области лавинообразного роста функции $U = f(Re_{возд})$ ($1500 < Re_{возд} < 2600$) и области срыва пламени ($Re_{возд} > 2600$).

Показано, что изменение начальных условий формирования диффузионного факела по φ и $Re_{топл}$ не оказывает влияния на качественный характер зависимостей $U = f(Re_{возд})$, а сопровождается лишь смещением точки лавинообразного нарастания U . При этом в диапазоне $Re_{возд} < 1500$ влияние параметра $Re_{топл}$ на скорость выгорания U отсутствует. Экспериментально определен диапазон значений угла между направлениями начального импульса топливной струи и подъемной силы $30^\circ < \varphi < 45^\circ$, характеризующийся максимальными значениями массовой скорости выгорания для всего семейства кривых $U = f(\varphi)$.

Выполнено численное моделирование выгорания комбинированных реагирующих струй в условиях детальной кинетической схемы процесса горения, с учетом термогравитационной конвекции в стационарной и нестационарной постановке на моделях горения PDF Flamelet и BVM. Это позволило детально проанализировать взаимосвязь структуры течения в комбинированной закрученной струе с процессами горения, протекающими в ней. В результате исследований получены данные об изменении параметра закрутки струи по ее длине для различных режимов по числу Re и начальному параметру закрутки, в различных условиях относительно влияния подъемной силы. Выполнена верификация расчетных данных по результатам экспериментов, даны рекомендации относительно корректного моделирования динамики закрученных комбинированных реагирующих струй.

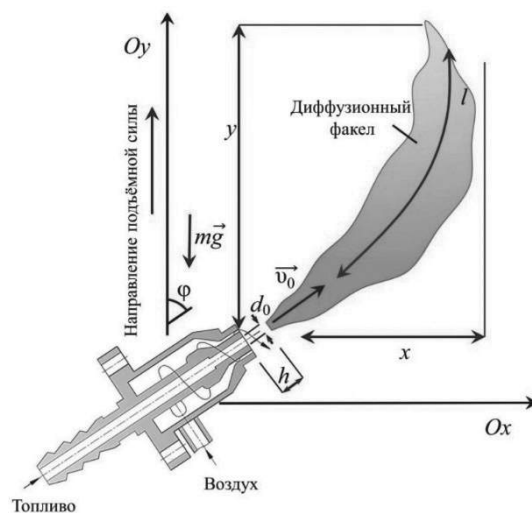


Рис. 1. Схема комбинированной закрученной струи: φ – угол между направлениями начального импульса и подъемной силы; l – криволинейная длина факела; x – проекция длины факела на направление горизонтали (ось Ox); y – проекция длины факела на направление вертикали (ось Oy); h – расстояние от сопла форсунки до точки стабилизации пламени; v_0 – начальная скорость струи; d_0 – диаметр сопла топливной форсунки.

Список литературы:

1. Evdokimov O.A., Guryanov A.I., Piralishvili Sh.A., Veretenikov S.V., Guryanova M.M. Special Features of the Formation of Diffusion Reacting Jets in a Swirled Air Flow // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2018. – Vol. 91. Pp 1267–1273.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №18-79-00180 «Теплофизика комбинированных реагирующих и импактных струйных течений»

АЛЛОТЕРМИЧЕСКАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СФОКУСИРОВАННОГО ПОТОКА СВЕТА

Егоров Р.И., Зайцев А.С., Табурчинов Р.И.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Технологии газификации углеводородных топлив получили широкое распространение в ходе преодоления дефицита топлив во время мировых войн XX в. Термическое разложение сложных углеводородов в условиях недостатка кислорода позволяет сконвертировать их в смесь горючих и негорючих газов (преимущественно CO, CO₂, H₂, CH₄ и других). Новый виток интереса к данным технологиям обусловлен всплеском «атомофобии» в странах ЕС и Японии после аварии на АЭС Фукусима-1. Разработка технологий комплексной газификации углей (IGCC) позволяет получить существенный рост КПД при конверсии тепловой энергии, заключенной в ископаемом топливе в электричество при минимальном воздействии на экологию.

Практически все применяемые ныне методики конверсии углеводородов в синтез-газ являются автотермическими, т. е. используют энергию горения малой части топлива для газификации остального объема. Это позволяет запустить процесс без дополнительных энергозатрат, однако накладывает ряд ограничений как на максимальные рабочие температуры, так и на скорости нарастания температур. Для получения высокой эффективности конверсии, процесс должен протекать при высоком давлении газов внутри реактора. Дополнительным фактором, усложняющим автотермическую конверсию высокотемпературных топливных смесей, является необходимость организации процесса периодического удаления шлака из горячего реактора с минимальными задержками.

Разработка новых методик, позволяющих организовать дешевый и удобный процесс газификации углеводородов представляет интерес как для науки, так и для промышленности.

В данной работе мы предлагаем использование сфокусированного солнечного света для создания мощных тепловых потоков, позволяющих аллотермическую газификацию отходов углеобогащения. В ряде работ нами было показано, что пороги интенсивности света для конверсии фильтр-кека каменного угля в синтез-газ (в основном состоящий из CO и H₂ + негорючие примеси и водяной пар) не превышают 800 Вт/см². Для конверсии бурых углей и торфов требуются гораздо меньшие интенсивности (порядка 200–300 Вт/см²). Использование солнечного света позволяет организовать практически бесплатный процесс газификации, который останавливается практически мгновенно после прекращения облучения.

Ранее было показано, что газификация влажных смесей на основе отходов обогащения каменного угля происходит без образования диоксида углерода. Таким образом, в процессе конверсии углерода участвует только один окислительный канал. Параметры химической кинетики данного процесса (энергия активации и предэкспонент) не известны досто-

верно и их определение представляет интерес как с научной, так и практической точки зрения. Используя результаты проведенных экспериментов (рабочие температуры, динамика компонентного состава синтез-газа и скорость изменения массы), а также ранее отработанную математическую модель окисления угля, мы получили достаточно реалистическую оценку энергии активации при образовании CO.

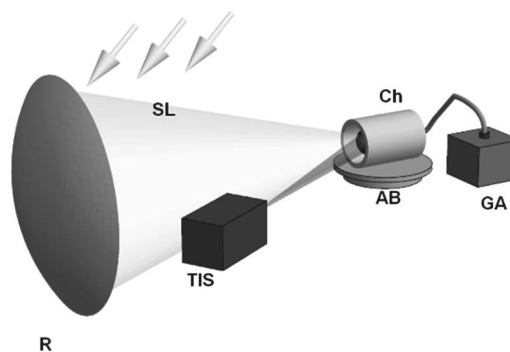


Рисунок 1. Схема экспериментального стенда с использованием солнечного света.

На схеме показаны: параболическое зеркало (R), поток солнечного света (SL), тепловизор (TIS), камера для топлива (Ch), газоанализатор (GA), платформа аналитических весов (AB).

Полученное значение (130–140 кДж/моль) хорошо коррелирует с данными, представленными в известных работах по газификации графита [1,2]

Анализируя зависимости скорости изменения массы образца топлива от времени облучения для различных интенсивностей света были получены оценки удельных энергозатрат на конверсию фильтр-кека (~3.5 МДж/кг). Данная величина показывает, что для газификации одного килограмма отходов требуется менее 1000 сек. облучения солнечным светом, собранным в ясный день с одного квадратного метра освещенной поверхности для большей части территории России.

Была проанализирована динамика высокотемпературного окисления углерода под действием мощного потока теплового излучения. Показано, что скорость окисления углерода на освещенной поверхности настолько высока, что выход водяного пара и CO снижают парциальное давление кислорода над освещенной поверхностью, полностью блокируя образование CO₂.

Список литературы:

1. J. N. Ong, Jr., On the kinetics of oxidation of graphite // Carbon, 1964, T.2, C 281–297.
2. Oxidation of carbon at high temperatures: reaction-rate control or transport control, Howard G. Maahs, NASA technical note TN D6310, Langley Research Center, 1971, 25 с.

ОСОБЕННОСТИ СВЕТО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ НИЗКОСОРТНЫХ ТОПЛИВ И ОТХОДОВ

Зайцев А.С., Егоров Р.И.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Утилизация отходов углеобогащения становится насущной задачей в регионах, где добыча угля идет уже многие десятилетия. Отвалы обогатительных фабрик занимают значительные площади, являясь причиной повышенного пылеобразования. Эффективная переработка содержимого отвалов позволит существенно улучшить экологическую ситуацию в таких регионах, а также даст возможность получать дешевую тепловую энергию.

Высокозольные и низкореакционные смеси углеводородов, получаемые в результате обогащения углей являются неудобным объектом, при использовании привычных технологий сжигания. Известные на данный момент методики автотермической газификации также не дают качественного результата при переработке таких отходов в силу их высокой зольности и невозможности организации непрерывного процесса.

Применение предложенной ранее методики свето-индуцированной газификации углеводородов позволяет эффективно конвертировать горючие компоненты отходов в синтез-газ. Использование солнечного света позволяет игнорировать затраты энергии на процесс конверсии.

С другой стороны, данная технология также может быть применена для переработки низкосортных топлив (торфы, бурые угли) в синтез-газ. Сравнение основных параметров процесса газификации отходов и низкосортных топлив позволяет заключить, что энергозатраты для конверсии отходов в несколько раз превосходят таковые для торфов и бурых углей. Процесс газификации низкосортных топлив требует многократно меньших интенсивностей светового потока ($\sim 100 \text{ Вт/см}^2$). В то же время газификация фильтр-кеков каменных углей протекает при интенсивностях более 800 Вт/см^2 .

Процесс конверсии отходов углеобогащения является аллотермическим, и останавливается практически мгновенно после отключения световой накачки. В случае низкосортных топлив замечен существенный вклад процесса беспламенного горения в разогрев исходного топлива. Именно этот процесс и обуславливает снижение требуемой мощности теплового потока от внешнего источника. В результате синтез-газ содержит большое количество CO_2 , что осложняет его дальнейшее применение. Таким образом, процесс конверсии низкосортных топлив перестает быть полностью аллотермическим. Однако, и в этом случае температура топлива быстро падает при

отключении световой накачки, прерывая процесс конверсии.

Состав синтез-газа, получаемого при конверсии отходов углеобогащения, существенно отличается от того, что образуется при газификации торфов и бурых углей. Во втором случае соотношение CO и CO_2 выходит порядка 1:1 при наличии втрое большего количества водорода.

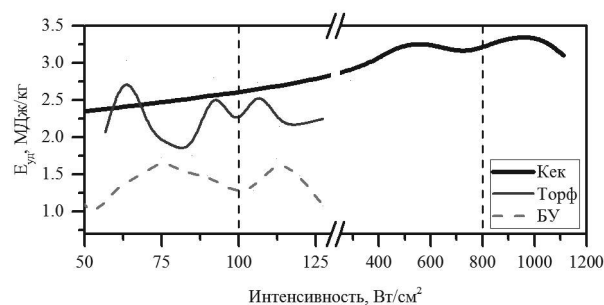


Рисунок 1. Затраты энергии от внешнего источника на конверсию одного килограмма топлив (фильтер-кек каменного угля Г, торф, бурый уголь).

Применение сфокусированного светового потока от некогерентных источников света позволяет получить синтез-газ с концентрацией CO до 6 об.%, плюс 1,5 об.% водорода. Данные значения, полученные в маломощной лабораторной установке, на порядок превышают показанные ранее [1] уровни эффективности.

Уровень производства вредных примесей (SO_2 , NO_x) при конверсии как отходов углеобогащения, так и торфа с бурым углем, оказывается существенно (от 2–3 раз до порядка величины) ниже чем при их непосредственном сжигании.

Использование солнечного света в качестве источника энергии процесса конверсии углеводородов позволяет создать эффективный цикл утилизации отходов, равно как и газификации низкосортных топлив. Данная технология может быть масштабирована как для уровня небольших промышленных потребителей, так и для домашнего использования.

Список литературы:

1. A.S. Zaitsev, R.I. Egorov, P.A. Strizhak Light-induced gasification of the coal-processing waste: Possible products and regimes // Fuel. – 2017. – V. 212. – P. 347–352.
2. A.S. Zaitsev, P. P. Tkachenko, M. V. Belonogov, R.I. Egorov Light-Induced Gasification of Fuels Prepared from Coal-Enrichment Wastes // Coke and Chemistry. – 2018. – V. 61. – P. 274–280.

Крикунова А.И.^{1,2}¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13/2² Московский физико-технический институт (Государственный университет),
141700, Россия, МО, Долгопрудный, Институтский пер., 9

Вопросы устойчивого горения газообразного топлива являются насущными как с точки зрения фундаментальных знаний, так и с точки зрения применимости. Влияние гравитационных сил на пламя, и в особенности на неустойчивости, является важной современной задачей, поскольку условия применения процессов горения расширяются. С практической точки зрения в технических устройствах необходимо, чтобы пламя оставалось устойчивым во всем диапазоне концентраций, и внешних воздействий. Соответственно, основными задачами стабилизации пламени в прикладной области является расширение диапазона скоростных и концентрационных пределов воспламенения и стабильного горения при внешних воздействиях. А также изучение принципов развития и подавление неустойчивостей, приводящих к погасанию. Для углубления понимания фундаментальных принципов процессов горения исследования проводят в условиях отличных от земных: при пониженной и повышенной гравитации. Для этого исследования проводят с использованием специальных устройств: центрифуг, вакуумно-динамических стендов или на МКС. Такие исследования являются дорогостоящими и трудоемкими. Изменение положения горелочного устройства в пространстве также позволяет изменить воздействие сил плавучести на пламя, при этом проведение таких исследований значительно проще. В настоящей работе проводились экспериментальные и расчетно-теоретические исследования свойств пламени при нормальной и ортогональной фиксации горелки в пространстве (условия нормальной и обратной гравитации).

Известно, что методы стабилизации процессов горения разделяют на активные и пассивные: Активные – где происходит изменение состава горючего и реагентов, или система получает постоянную или периодическую подпитку энергией. Так используют постоянный или переменный электрический ток, пилотное пламя. Пассивные методы изменяют геометрию потока, например, при помощи стабилизирующих тел. Поскольку воздействие гравитационных сил зависит от геометрии потока, а изменение геометрии потока может повышать устойчивость горения, то целесообразным, как с практической, так и с фундаментальной точки зрения является исследование свойств пламени при вариации геометрии потока и гравитационного воздействия

В настоящей работе проводились исследования открытого метано-воздушного пламени, стабилизированного тонким поперечным цилиндром (обратное коническое пламя) в условиях нормальной и обратной гравитации. А также проведены сравнения с данными для аналогичного конического пламени. Экспериментально показано, что обратное коническое пламя более устойчиво по сравнению с коническим пламенем (см. рис. 1), однако гравитационные силы

не влияют на положения границ срыва пламени. Высокоскоростная видео-съемка хемолюминесценции пламени позволила оценить его основные характеристики. Численное моделирование проводилось методом конечных элементов на основе программного комплекса FlowVision. Моделировалась полная система уравнений Навье-Стокса для вязкого сжимаемого газа. Решение проводилось с использованием модели RANS $k-\omega$ SST. Экспериментальная и расчетная геометрия горелки, а соответственно и потока, совпадали. Показано совпадение экспериментальных и расчетных данных. Полученные результаты позволили оценить динамику фронта пламени в условиях нормальной и обратной гравитации в зависимости от геометрии потока, в широком диапазоне вариаций скорости истечения горючей смеси и соотношения компонентов.

Экспериментальные исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00462.

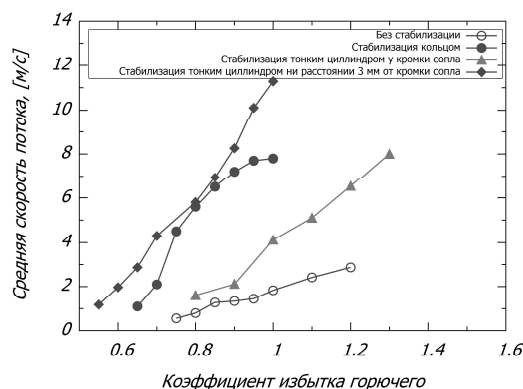


Рис. 1. Границы срыва пламени при вариации стабилизирующего тела.

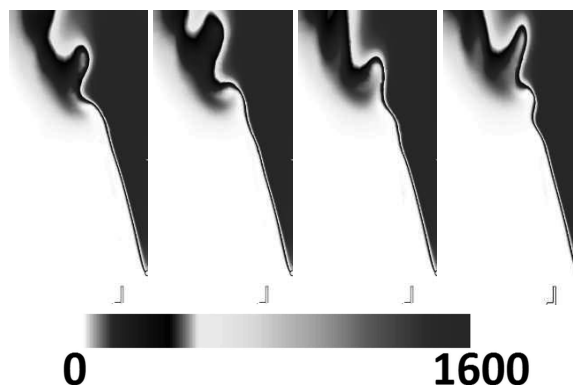


Рис. 2. Динамика поля температур пламени в условиях нормальной гравитации. $Re=1000$, $\phi=0.8$.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ В КАНАЛАХ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Кукшинов Н.В.^{1,2}, Батура С.Н.¹

¹ ГНЦ ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, Россия,
111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2

² НИУ «МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва, Россия,
105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

На сегодняшний день в мире наблюдается повышенный интерес к разработке высокоскоростного прямоточного двигателя на водородном топливе, который рассматривается как часть комбинированной силовой установки для гиперзвуковых гражданских самолетов и первых ступеней космических систем для вывода полезной нагрузки на орбиту. При разработке высокоскоростных камер сгорания на водородном топливе большое внимание уделяется повышению эффективности организации сгорания топливно-воздушной смеси. В случае высокоскоростных течений, когда время пребывания топливно-воздушной смеси в проточном тракте мало, эффективность горения определяется не только качеством смешения компонентов, но и химической кинетикой. Для математического моделирования процессов смешения и горения водородно-воздушной смеси при высокоскоростном течении компонентов используются различные расчетные схемы, модели турбулентности и механизмы химической кинетики, которые могут приводить к существенно различным результатам. Важной для моделирования высокоскоростных реагирующих потоков является модель взаимодействия турбулентности с горением (TCI).

В работе проводилось численное моделирование горения водородно-воздушной смеси в случае осесимметричного течения в проточном тракте конфигурации эксперимента Бича-Эванса-Шекснайдера [1] и плоского течения в проточном тракте конфигурации эксперимента Барроуса-Куркова [2]. При чис-

ленном моделировании варьировались модели турбулентности (модель Секундова, Ментера и γ -Re Θ), механизмы химической кинетики (Димитрова, Хэнсона-Хонга, Старика), модели взаимодействия турбулентности с горением (laminar finite rate, eddy-dissipation concept, flamelet). Также вследствие отсутствия данных об уровне турбулентности потока на входе варьировался параметр относительной турбулентной вязкости (отношение турбулентной вязкости к молекулярной).

В результате выполненных расчетных исследований были определены поля концентраций компонентов реагирующей смеси и выполнена валидация расчетных моделей по экспериментальным данным. Показано, что при скорости водородной струи и спутного потока модельного воздуха, соответствующих числу Маха $M \sim 2$, определяющим является механизм турбулентного перемешивания.

Список литературы:

1. Evans J.S., Schexnayder C.J., Beach H.L. Application of Two - Dimensional Parabolic. Computer Program to Prediction of Turbulent Reacting Flows. NASA TP-1169. 1978. P. 60.
2. Burrows M.C., Kurkov A.P. An Analytical and Experimental Study of Supersonic Combustion of Hydrogen in Vitiated Air Stream. AIAA J. 1973. Vol. 11, № 9. P. 1217–1218.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке
РФФИ в рамках научного проекта №18-31-00254*

ВЛИЯНИЕ НЕОРГАНИЧЕСКОЙ СОЛИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ, ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ

Ларионов К.Б.¹, Мишаков И.В.²

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет

634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

² Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН

630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 5

e-mail: laryk070@gmail.com

Ранее [1] нами было установлено, что использование неорганических солей в качестве иницирующих добавок для энергетических углей приводит к интенсификации процесса окисления, что способствует снижению начальной температуры возгонки летучих соединений и их зажигания.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования характеристик процессов окисления, зажигания и горения каменного угля, модифицированного неорганической солью $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ в количестве 5 мас.%

В работе был использован образец каменного угля марки Т шахты Алардинск Кузбасского угольного бассейна. Исходный образец измельчали в шаровой мельнице и затем фракционировали на ситах с размером ячеек менее 80 мкм. Технические характеристики исследуемого образца определялись согласно стандартным методам [2] и приведены в таблице 1.

Таблица 1. Состав исходного образца угля.
Индекс r – рабочая масса топлива.

Характеристика	Ед.измерения	Значение
Влажность W^r	масс.%	0,3
Выход летучих V^r		13,1
Зольность A^r		16,5
Углерод C^r		70,1

Иницирующая добавка $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ наносилась на образец угля методом пропитки по влагоемкости в водо-спиртовом растворе. После смешения угли высушивались в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 20 часов. Содержание $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ в приготовленном образце составляло 5 мас.% (в пересчете на сухую соль).

Экспериментальное исследование процесса окисления проводилось с помощью термического анализатора. Образец массой ~15 мг подвергался нагреванию в корундовом тигле с перфорированной крышкой в интервале температур 25–600 °С при скорости нагрева 2.5 °С/мин. В качестве окислительной среды использовали смесь воздуха (60 мл/мин) и азота (10 мл/мин). Для исследования процессов зажигания и горения использовался экспериментальный стенд, включающий в себя гидравлический пресс для подготовки топливных гранул, камеру сгорания (работающую при атмосферном давлении), автоматическое координирующее устройство и скоростную видеосъемку. Более подробное описание данной уста-

новки и экспериментальной методики приведено в работе [3].

По данным термического анализа установлено, что температура начала интенсивного окисления t_i при введении промотора $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ снизилась на 97 °С.

На рисунке 1 представлены некоторые кадры скоростной видеосъемки, визуализирующие процесс зажигания и последующее горение в режиме пламени модифицированного образца каменного угля.

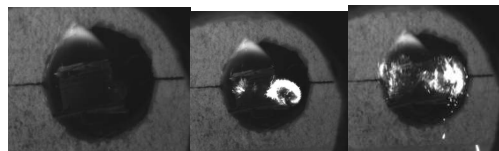


Рис. 1. Процессы зажигания и горения в режиме пламени модифицированного нитратом меди образца каменного угля.

На основании полученных данных видно, что в момент образования стабильного пламени (временной интервал 10–12 с) наблюдается периодическая детонация исследуемого образца, эпицентр которой расположен во внутренней части топливной гранулы. Данный эффект может быть связан с термодетонированием и последующим расширением поровой структуры угля [1] в результате которого выделяется относительно большой объем горючих газов. Существенным отличием горения модифицированного образца в отличие от исходного, является образование пламени вблизи топливной гранулы, что может быть связано с активным высвобождением летучих веществ с поверхности и внутреннего объема образца при разложении нитрата меди.

Список литературы:

1. Larionov K.B., Mishakov I.V., Gromov A.A. Research of thermal destruction dynamics of coal particles in oxidizing medium with copper nitrate // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1128. 012070.
2. Li Q., Lin Y., Exergy analysis of the LFC process // Proc. International Heat. 2016. V.108. P.348–354.
3. Kuznetsov G.V., Yankovskii S.A. Conditions and characteristics in ignition of composite fuels based on coal with the addition of wood // Steam boilers, power-plant fuels, burner units, and boiler auxiliary equipment. 2019. V. 66 (2). P. 133–137.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Минобрнауки РФ, в рамках реализации проекта
№13.7644.2017/БЧ

ОСОБЕННОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩЕЙ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В МОДЕЛЬНЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Кукшинов Н.В.^{1,2}, Батура С.Н.¹, Мамышев Д.Л.^{1,2}, Французов М.С.^{1,2}

¹ ГНЦ ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, Россия,
111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2

² НИУ «МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва, Россия,
105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

В части создания высокоскоростных летательных аппаратов актуальной является задача создания высокоскоростного прямооточного двигателя на водородном топливе. При разработке такого двигателя большое внимание должно быть повышению эффективности организации смешения топливно-воздушной смеси. В случае высокоскоростных течений, когда время пребывания топливно-воздушной смеси в проточном тракте мало, эффективность горения определяется не только качеством смешения компонентов, но и химической кинетикой. Для математического моделирования процессов смешения и горения водородно-воздушной смеси при высокоскоростном течении компонентов используются различные расчетные схемы, модели турбулентности и механизмы химической кинетики, которые могут приводить к существенно различным результатам. Важной для моделирования высокоскоростных реагирующих потоков является модель взаимодействия турбулентности с горением (TCI).

В работе проводилось численное моделирование горения водородно-воздушной смеси в модельных камерах сгорания экспериментальных конфигураций проточных трактов проекта «Холод» [1] и HyShot [2]. При численном моделировании варьировались модели турбулентности (модель Секундова, Ментера и γ -Re Θ), механизмы химической кинетики (Димитрова, Хэнсона-Хонга, Старика), модели взаимодействия турбулентности с горением (laminar finite rate, eddy-dissipation concept, flamelet).

В результате исследований были получены поля массовых концентраций компонентов и параметров потока, выполнена валидация расчетных моделей по распределениям давления. На рис. 1 представлены расчетные варианты двух моделей. Средняя относительная погрешность определения статического давления по стенкам проточного тракта в обоих случаях не превышает 15%.

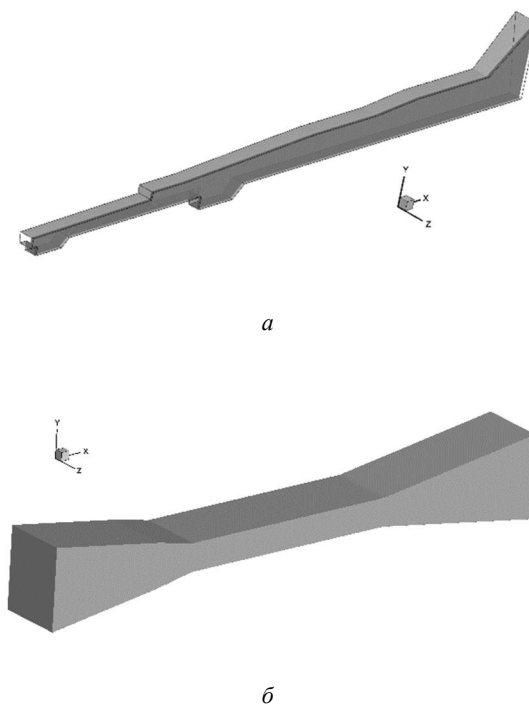


Рис. 1. Расчетный вариант модели «Холод» (а) и HyShot (б).

Список литературы:

1. Roudakov A.S., Semenov V.L., Hicks J.W. Recent Flight Test Results of the Joint CIAM-NASA Mach 6.5 Scramjet Flight Program. NASA TP-1998-206548. 1998. P. 15.
2. Xing F., Cai J., Huang Y., Yao Y. «Numerical Analysis of HyShot Scramjet Model with Different Throat Heights». AIAA-2017-2121. 2017. P. 12.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-31-00254

СКОРОСТЬ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В КАПЛЕ И В ТОНКОМ СЛОЕ ВОДНОГО РАСТВОРА СОЛИ LiBr

Мисюра С.Я., Морозов В.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Современные технологии часто сталкиваются с высокими тепловыми потоками и скоростями кристаллизации. Моделирование нанопокровов осложняется одновременным влиянием сопутствующих факторов: ограниченность объёма среды, высокий тепловой поток от стенки и от свободной поверхности раствора, неоднородность и анизотропность кристаллизации, нестационарность и неизоэнтермичность. Очевидно, что точное моделирование кристаллизации с учётом всех перечисленных факторов невозможно. Поэтому развитие данных технологий невозможно без проведения экспериментальных исследований. Солевые растворы широко применяются в энергетике, в химических технологиях и в технологиях опреснения воды. Часто процессы затвердевания сталкиваются одновременно как с каплями, так и с тонкими плёнками.

Цель настоящей работы – проведение сравнения скорости кристаллизации в капле воды и в тонком растворе соли LiBr, выявление особенностей и различий между кристаллизацией в капле и слое. На рис. 1 приведены экспериментальные кривые кристаллизации для капли (2) и слоя (1).

Установлено, что индукционный период кристаллизации и место возникновения первого кристаллического центра для капли и слоя существенно различаются. Скорость кристаллизации в слое во много раз выше, чем в капле.

Учёт установленных особенностей кристаллизации и неизоэнтермического теплообмена важно знать для корректного моделирования и для улучшения эффективности технологий.

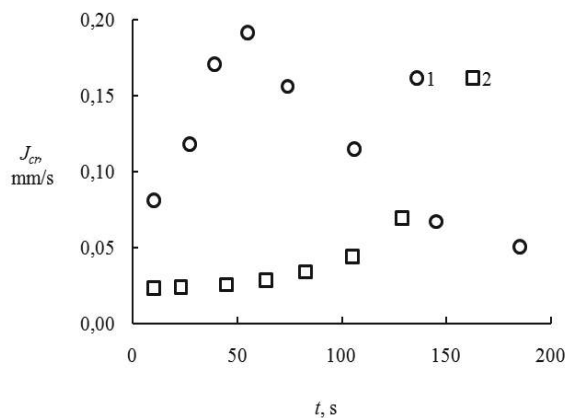


Рис. 1. Скорость кристаллизации (J_{cr}) в слое (точки 1) и в капле (точки 2) раствора соли LiBr ($h_0=2.1$ mm; $T_w=65^\circ\text{C}$; $C_0=40\%$).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 15-19-10025

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИССОЦИИИ ПРИРОДНОГО ГИДРАТА МЕТАНА В ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Мисюра С.Я., Морозов В.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

На сегодняшний день открытые запасы гидрата метана находятся, в основном, в труднодоступных глубоководных местах, что существенно осложняет их добычу. Для добычи гидрата природного газа применяют бурение скважин и используют стимулирование распада за счёт тепловых факторов, падения давлений, применения химических добавок и поверхностно активных веществ. Большинство исследований касаются численных расчётов. Однако, при расчётах имеется множество параметров, которые неопределенны и скорость добычи может быть существенно завышена из-за неточности расчётов. Поэтому, необходимы дополнительные экспериментальные данные для апробации существующих моделей.

Цель исследований настоящей работы – определение экспериментальной зависимости для скорости распада J природного гидрата метана от нескольких ключевых факторов. Исследовано влияние скорости потока воздуха U и концентрации метана C_h в порошке на скорость диссоциации.

На рис. 1 приведены экспериментальные данные по скорости распада гидрата природного газа при его горении (при постоянной высоте канала для воздуха $H=30$ мм) в зависимости от скорости набегающего потока воздуха U . Зависимость для J имеет нелинейный характер. Экстремум (максимум) соответствует скорости $U=0.6$ м/с.

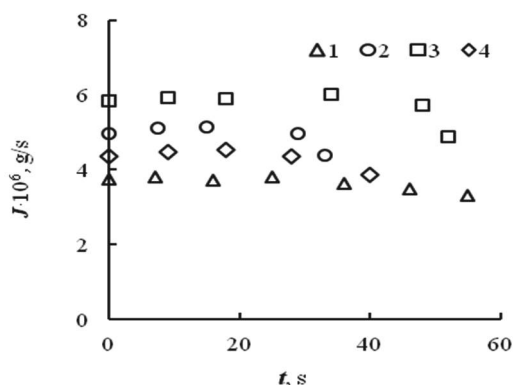


Рис. 1. Скорость диссоциации $J=\Delta m/(\Delta t)$ при горении гидрата природного газа: 1 – $U=0$ м/с; 2 – $U=0.3$ м/с; 3 – $U=0.6$ м/с; 4 – $U=2$ м/с (высота канала для воздуха $H=30$ мм).

Установлено, что скорость распада практически не зависит от начальной концентрации метана. При распаде образца возникают большие поперечные и продольные градиента температуры внутри слоя, которые необходимо учитывать при моделировании диссоциации. Тепловизионные измерения показали, что максимальные тепловые градиенты относятся к боковым стенкам резервуара с образцом.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 15-19-10025

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ АЭРОВЗВЕСИ СМЕСИ ПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ И БОРА

Моисеева К.М., Крайнов А.Ю.

Томский государственный университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

Доклад посвящен теме горения аэровзвеси порошков бора и алюминия. Активно исследование горения порошков бора велось в 60-х годах XX века. В частности, были выполнены некоторые теоретические и численные исследования горения частиц бора. Основным выводом из работ являлось то, что механизм горения частиц бора отличен от механизма горения алюминия и сильно зависит от температуры окружающей среды [1–2]. В настоящее время тема горения топлив, в состав которых входит бор, снова набирает актуальность.

Сильное влияние окружающих условий на закономерности окисления, воспламенение и горения частиц бора приводит к тому, что не всегда можно предсказывать поведение топлив, в состав которых входит порошок бора. В тоже время топлива на основе бора привлекательны своими энергетическими характеристиками. Требуется исследовать поведение порошка бора в процессах воспламенения, в том числе совместно с другими высокоэнергетическими материалами, например, алюминием.

В настоящей работе поставлена задача, разработать модель горения аэровзвеси смеси порошков бора и алюминия и определить влияние состава смеси порошков на скорость горения аэровзвеси.

Физико-математическая постановка задачи строится на основе ранее разработанной модели горения порошка алюминия в воздухе [3] и дополняется уравнениями баланса массы, импульса и энергии частиц бора, баланса массы оксида бора в частицах и в газе, уравнением счетной концентрации частиц. Модель окисления и горения бора строится на основе [1–2, 4]. Полагается, что на первом этапе, при низкой температуре частицы бора, окись бора находится в конденсированном состоянии и образует на поверхности частицы пленку, учитывается реакция окисления частицы с образованием оксида и испарением оксидного слоя, реакций в газовой фазе нет. На втором этапе, при температуре частицы бора выше температуры кипения окиси бора, полагалось, что продукты реакции образуются в газообразном виде, окисной пленки нет, частица бора горит аналогично частице угля. Кинетика горения соответствовала данным [1–2, 4]. В уравнениях баланса массы, импульса, энергии газа и уравнении баланса массы окислителя в правых частях учитывалось тепловое, химическое и инерционное взаимодействие между газом и частицам аналогично модели [3].

Метод решения задачи соответствовал методам, описанным в работах [3, 5]. Из расчетов определялась нормальная и видимая скорость горения смеси порошков бора и алюминия в воздухе в зависимости от массовых концентраций порошков и размера частиц алюминия и бора в порошках.

На рис. 1 представлена динамика распространения фронта горения аэровзвеси порошка бора. Показаны кривые, соответствующие изменению радиуса

частиц бора и алюминия по пространству через равные промежутки времени. Расчет выполнен для взвеси смеси порошков бора и алюминия с радиусом частиц 1 мкм (бор) и 0.5 мкм (алюминий). Общая масса частиц равнялась $0,2 \text{ кг/м}^3$, что соответствовало горению в недостатке окислителя.

Согласно результатам расчета частица бора успевает частично окислиться с накоплением оксида на поверхности (растет радиус $r_{k,b}$), так как температура газа во фронте высока, то оксид быстро испаряется и частица реагирует в газофазном режиме. Частицы алюминия реагируют медленнее частиц бора и не сгорают полностью из-за нехватки окислителя.

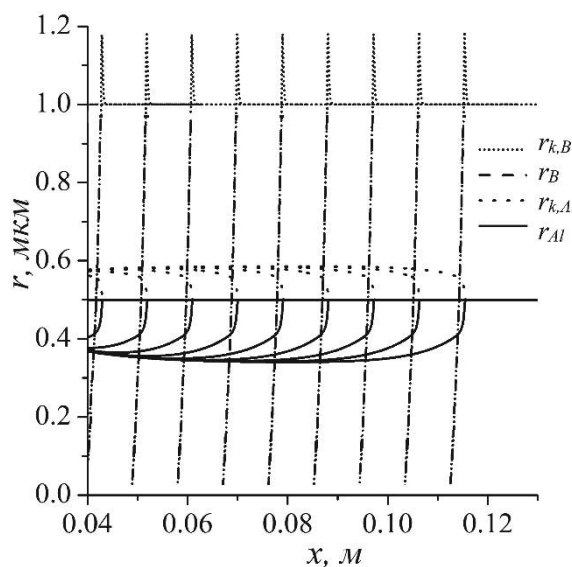


Рис. 1. Динамика изменения радиуса частиц бора по пространству через фиксированные моменты времени.

Видимая скорость горения аэровзвеси порошка для описываемого случая составила 4.5 м/с . Нормальная скорость горения составила 0.2 м/с .

Список литературы:

1. King M. K. Boron Ignition and Combustion in Air-Augmented Rocket Afterburners // Combustion Science and Technology. 1972. V. 5. № 4. Pp. 155–164.
2. Вовчук Я. И., Золотко А. Н., Клячко Л. А., Полищук Д. И. Высокотемпературное горение неподвижной частицы бора в кислородсодержащей среде // ФГВ. 1975. Т. 11. № 4. С. 556–563.
3. Moiseeva K M., Krainov A Yu Investigation on focal ignition and combustion of aluminum-air suspension // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1105. № 012034.
4. Ягодников Д. А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2009. – 432 с.
5. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю. Численное моделирование искрового зажигания аэровзвеси угольной пыли // ФГВ. 2018. Т. 54. № 2. С. 61–70.

Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда (проект №17-79-20011)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ С НЕПРЕРЫВНО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ В МОДЕЛЬНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Кузьмичев Д.Н.¹, Сидоров Р.С.¹

¹ Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова,
111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2

Одним из способов организации рабочего процесса в прямоточных кольцевых камерах сгорания (КС) является сжигание топливовоздушной смеси в непрерывно вращающейся детонационной волне (ДВ). Важным преимуществом такой КС является её небольшая длина. Течение, при этом, имеет сложную нестационарную структуру и зависит от многих факторов, в частности, от полного давления воздуха, поступающего в КС, и давления на выходе из неё [1], вида и способа подачи топлива, коэффициента избытка воздуха. Исследование влияния данных факторов на характеристики ДВ и КС в целом для удобства проведения измерений, а также по экономическим причинам целесообразно проводить на модельных установках на присоединённом воздухопроводе.

В данной работе проводится численное моделирование рабочего процесса в установке детонационного горения в обеспечение эксперимента с целью определения параметров потока и геометрии КС, при которых может осуществляться режим горения в непрерывно вращающейся детонационной волне. Задачи решаются в нестационарных двумерной и трёхмерной постановках. Параметры на входе рассчитываются при помощи системы микросопел Лавала с противодавлением [2,3]. На выходе из КС задаётся атмосферное давление. На рис. 1 и 2 представлены примеры трёхмерного расчёта течения в камере цилиндрической геометрии.

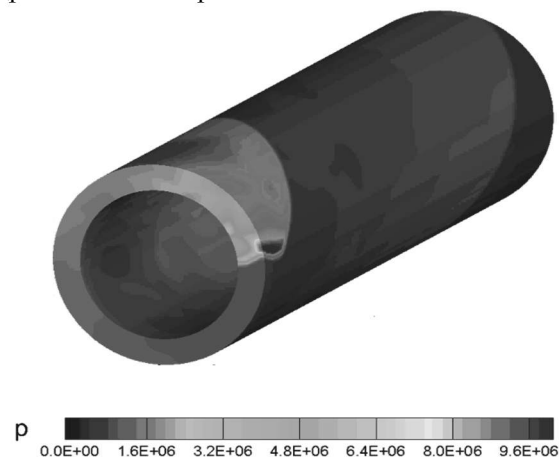


Рис. 1. Поле давления в кольцевой цилиндрической камере сгорания.

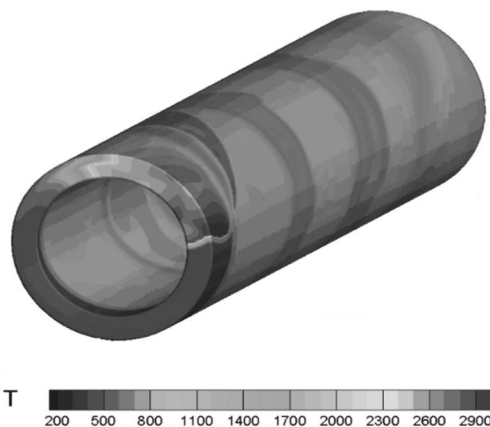


Рис. 2. Поле температуры в кольцевой цилиндрической камере сгорания.

В результате проведённых расчётов определены условия, при которых реализуется необходимый режим работы КС экспериментальной установки, исследовано влияние различных факторов на параметры ДВ, рассмотрены различные формы центрального тела.

Список литературы:

1. Schwer D., Kailasanah K. Numerical investigation of the physics of rotating-detonation-engines // Proceedings of the Combustion Institute, № 33, 2011, P. 2195–2202.
2. Быковский Ф.А., Ждан С.А. Непрерывная спиновая детонация. Издательство СО РАН, Новосибирск, 2013.
3. Babushenko D.I., Kopchenov V.I. Influence of combustion chamber size on the existence of rotating detonation wave: modeling study // Nonequilibrium processes in physics and chemistry Edited by A.M. Starik and S.M. Frolov. Moscow, 2016. C. 309–318.

ЭЛЕКТРОИСКРОВОЕ МНОГООЧАГОВОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ ГАЗОВЫХ ЗАРЯДОВ В ВОДЕ

Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

e-mail: teslenko@hydro.nsc.ru

Проблемы оптимального инициирования горения топлив в различных двигателях и движителях являются актуальными и требуют постоянного совершенствования.

В данной работе представлены экспериментальные результаты исследований инициирования пропан-кислородных газовых зарядов в воде с кольцевой геометрией. Инициирование осуществлялось синхронно с помощью 2, 4 и 6-электрических разрядов, располагаемых вдоль образующей по кольцу диаметром 52 мм. Искры на разрядных промежутках (0,3÷1 мм) создавались от единого конденсаторного накопителя с энергией 2 Дж. На рисунке представлены две кинограммы инициирования сжигания стехиометрического пропан-кислородного заряда объемом 6 см³.

Исследования различия процессов энерговыделения при сжигании газовых зарядов осуществлялись путем измерения удельных импульсов силы.

Показано, что для одинаковых газовых зарядов импульсы тяги при инициировании газа многоочаговыми искровыми разрядами имеют качественные и

количественные преимущества по сравнению с одиночными очагами инициирования [1].

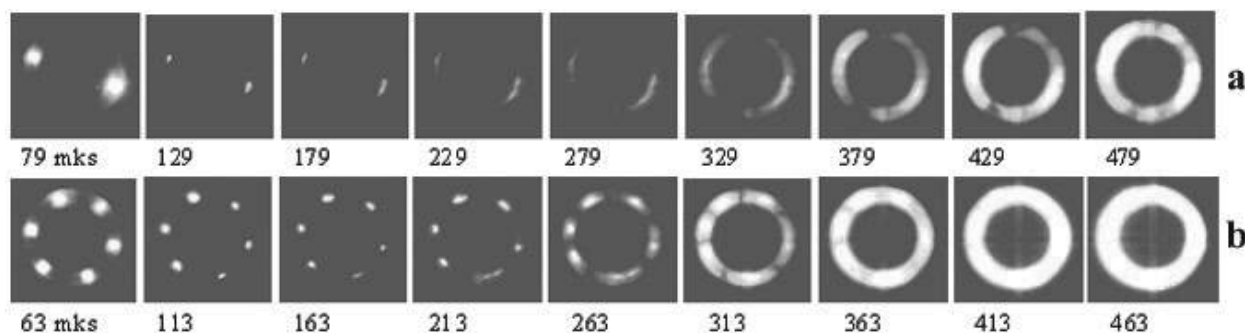
Амплитуда импульсов силы увеличивается с увеличением числа очагов до 30% для одинаковых газовых зарядов за счет более ускоренного сжигания всего объема газового заряда. Удельный импульс увеличивается до 20% при увеличении числа очагов с 2 до 6.

Выводы. Полученные экспериментальные результаты показали, что многоочаговое инициирование газовых зарядов может обеспечивать более быстрое и равномерное сжигание заданного объема газового заряда, с увеличением удельных импульсов тяги, без генерации детонационных режимов.

Список литературы:

1. В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, Р.Н. Медведев. Сжигание газов в воде для генерации тяги // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Том 24, № 4. С. 599–608. <http://swsl.hydro.nsc.ru/publ/Teslenko-TiA2017.pdf>.

Работа выполняется при частичной поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области (грант № 18-48-540011)



МОДОВАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СФЕРИЧЕСКОГО ФРОНТА ГОРЕНИЯ ЧЕПМЕНА-ЖУГЕ

Трилис А.В.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

В работах [1, 2] была исследована линейная модовая устойчивость цилиндрического фронта дефлаграционного горения Чепмена-Жуге в плоско-радиальной кольцевой камере сгорания в применении к моделированию начального (линейного) этапа развития вращающихся поперечных квазидетонационных волн [3, 4]. При изучении явлений вибрационного и автоколебательного горения, например, в жаровых трубах камер сгорания газотурбинных двигателей возникает потребность изучать устойчивость фронтов горения сферической конфигурации. Данные задачи и явления возникают при решении проблем устойчивости и оптимизации процессов горения в энергетических установках, что определяет актуальность темы исследования.

В настоящей работе в рамках акустического приближения проведено исследование линейной модовой устойчивости сферического фронта дефлаграционного горения Чепмена-Жуге в сферически расходящемся дозвуковом потоке горючей смеси с малым числом Маха.

Были получены уравнения, которым удовлетворяют акустические возмущения потока и фронта горения при условии малости числа Маха стационарного сферически расходящегося потока. Для нестационарных акустических возмущений на фронте горения были получены условия в результате линеаризации общих граничных условий движущегося сильного разрыва, являющихся законами сохранения массы, импульса, энергии, а также кинематического условия, связывающего нормальную скорость движения фронта со скоростью горения относительно потока горючей смеси.

В результате расчёта малых акустических возмущений потока горючей смеси и фронта горения были получены моды и квазисобственные частоты (реальные части определяют частоту колебаний, а мнимые части квазисобственных частот определяют развитие колебаний по времени) колебаний и волн, возникающих в системе.

Влияние системы подачи горючей смеси учитывается при помощи соответствующих граничных условий на начальной сфере подачи. Рассматривались три физических ситуации в системе подачи: 1 – отсутствуют возмущения расхода, 2 – отсутствуют возмущения радиальной скорости, 3 – отсутствуют возмущения давления.

Обнаружено, что если в системе подачи горючей смеси постоянно давление или радиальная скорость подачи, то существует дискретное множество частот и мод соответствующих колебаний и волн, для которых сферический фронт горения является неустойчивым. При помощи численно-аналитических исследований получена пространственная форма (вид) этих колебаний и волн. Показано, что существуют радиальные сферические колебания и азимутальные волны на поверхности фронта горения, амплитуды которых растут по времени.

Также было показано, что при отсутствии возмущений расхода в системе подачи все квазисобственные частоты имеют отрицательную мнимую часть, и сферический фронт горения устойчив.

Полученные аналитические решения рассмотренных задач могут быть полезны в качестве частного случая для тестирования численных алгоритмов решения более сложных и общих задач по данной тематике исследований.

Список литературы:

1. Трилис А.В., Сухинин С.В., Васильев А.А. Устойчивость цилиндрического фронта пламени в кольцевой камере сгорания // Сибирский журнал индустр. математики. 2017. Т. 20. № 4. С. 67–79.
2. Trilis A V, Sukhinin S V, Vasiliev A A. Traveling circumferential unstable wave of cylindrical flame front // IOP Conference series. 2016. Vol. 722. DOI: 10.1088/1742-6596/722/1/012039.
3. Войцеховский Б.В. Стационарная детонация // ДАН СССР. 1959. Т. 129. № 6. С.1254–1256.
4. Михайлов В.В., Топчий М.Е. К исследованиям непрерывной детонации в кольцевом канале // ФГВ. 1965. Т. 1. № 4. С. 20–23.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ФРОНТА ДЕТОНАЦИИ ДВУХТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ

Троцюк А.В.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

В представленной работе изложены исследования по численному моделированию двумерной многофронтной структуры детонационных волн (ДВ) в двухтопливных смесях. Изучения явления детонации в таких смесях базируется на предложенной нами в [1] приведенной модели детонационной кинетики газовых смесей на основе метана. Данная кинетическая модель была обобщена [2] на случай двух-топливной смеси вида $a_1C_nH_m + a_2H_2 + a_3CO + a_4O_2 + a_5N_2$, $a_4 \geq n/2$, $a_1 = 0$ если $a_2 \neq 0$, $a_2 = 0$ если $a_1 \neq 0$. Модель является двухстадийной (период индукции и зона основного тепловыделения).

Реальные многостадийные химические реакции, проходящие во время периода индукции, заменяются одной брутто-реакцией, которая должна удовлетворять некоторым условиям, зависящим от начального состава смеси.

Для расчета средней молярной массы газа после истечения периода индукции и старта процесса тепловыделения используется одно дифференциальное кинетическое уравнение. Исходя из этой величины по алгебраическим формулам рассчитываются величина тепловыделения, внутренняя энергия смеси, показатель адиабаты, а также температура и давление в зоне реакции.

Константы кинетической модели имеют четкий физический смысл. Она проста, согласована со вторым началом термодинамики и удовлетворяет принципу Ле-Шателье.

Предложенная модель кинетики была усовершенствована и верифицирована при проведении численных двумерных расчетов структуры ДВ в смеси синтез-газа $((1-\alpha)CO + \alpha H_2)$ с кислородом и воздухом. Нами была выдвинута полуэмпирическая формула для расчета длительности периода индукции в рассматриваемой двух-топливной смеси, основанная на известных Аррениусовских константах периода индукции для монотопливных смесей и экспериментальных данных по размерам детонационных ячеек согласно подходу [3].

В качестве первого этапа была исследована многофронтная структура ДВ в стехиометрической смеси $0,9CO + 0,1H_2 + 0,5O_2$ синтез-газа с кислородом ($\alpha = 0,1$) при стандартных условиях $p_0 = 1 \text{ атм}$, $T_0 = 298,15 \text{ К}$.

Анализ 2D структуры ДВ в широком канале (высотой $H = 3,25 \text{ см}$ примерно в 10–11 детонационных ячеек) после выхода детонации на самоподдерживающийся режим Чепмена-Жуге показал, что помимо основных поперечных волн (ПВ) на фронте имеется значительное количество вторичных ПВ. Аналогичная структура ДВ была получена в детонации смесей на основе метана [1]. В целом, ячеистая структура ДВ в смеси синтез-газа достаточно нерегулярна, а дви-

жение основных ПВ носит довольно несогласованный (хаотичный) характер.

Для уточнения преобладающего поперечного размера детонационной ячейки a_0 была проведена серия численных экспериментов с уменьшающимся размером высоты канала H , было получено что $H = 0,3 \text{ см} \geq a_0$ и $H = 0,25 \text{ см} \leq a_0$.

Из анализа 2D полей течения видно, что на фронте ДВ в данной смеси при $H \approx a_0$ имеются несколько вторичных ПВ и значительное количество третичных и еще более мелких ПВ. Кроме того, иногда наблюдаются пакеты несгоревшего газа за фронтом ДВ. Таким образом, размер детонационной ячейки в рассматриваемой смеси определен нами как $0,25 \leq a_0 \leq 0,3 \text{ см}$. Заметим, что он хорошо соответствует размеру a_0 , рассчитанному по аналитической формуле Васильева-Николаева.

Аналогичным образом с вариацией ширины канала H была численно исследована двумерная многофронтная (ячеистая) структура ДВ в стехиометрической смеси синтез-газа с воздухом при стандартных начальных условиях. При $\alpha = 0,3$ размер детонационной ячейки был определен равным $a_0 = 0,35 \text{ см}$. При $\alpha = 0,1$ размер ячейки составил $a_0 = 1,2 \text{ см}$. По мере уменьшения величины α увеличивается степень нерегулярности многофронтной структуры ДВ, увеличивается количество вторичных, третичных и т.д. ПВ на лидирующем ударном фронте ДВ, возрастает количество областей несгоревшего газа за фронтом ДВ. Возрастание размера ячейки по мере уменьшения доли водорода в смеси соответствует экспериментальным данным.

В настоящее время проводятся численные исследования по изучению многофронтной структуры ДВ в двух-топливной смеси тяжелого углеводорода гексана и окиси углерода $((1-\alpha)CO + \alpha C_6H_{14})$ с воздухом. Рассматриваются стехиометрические смеси с различными значениями α при стандартных условиях. Полученные результаты будут отражены в докладе.

Работа выполнена с использованием вычислительных ресурсов Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук (МСЦ РАН).

Список литературы:

1. Fomin P.A., Trotsyuk A.V., Vasil'ev A.A. Approximate model of chemical reaction kinetics for detonation processes in mixture of CH_4 with air // Combustion Science and Technology. 2014. Vol. 186. № 10–11. P. 1716–1735.
2. Троцюк А.В., Фомин П.А. Моделирование нерегулярной ячеистой структуры детонационной волны в двухтопливной смеси // Физика горения и взрыва. 2019. Т. 55. № 4. В печати.
3. Васильев А.А. Задержка воспламенения в многотопливных смесях // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43. № 3. С. 42–46.

Работа поддержана РФФИ (грант № 17-03-01351)

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ НЕПИЩЕВЫХ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Цибульский С.А.¹, Слюсарский К.В., Ларионов К.Б.¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: s.tzibulsky@yandex.ru

Применение твердых бытовых отходов (ТБО) в качестве источника энергии позволяет экономить ископаемые виды топлива, снижать потребление воды, электрической и тепловой энергии, а также сокращать выбросы в атмосферу вредных веществ [1].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик процессов воспламенения и горения различных образцов непищевых твердых бытовых отходов (ТБО).

В работе были использованы следующие образцы массой 200 мг: вторичные опилки, картон, кожа, резина, пластик, текстиль. Подготовка образцов заключалась в предварительном измельчении исходного образца и последующем брикетировании методом холодного прессования [2]. Элементный состав исследуемых образцов определялся с помощью анализатора элементного состава Vario Micro Cube (Elementar, Германия) и приведен в таблице 1.

Таблица 1. Элементный состав образцов непищевых ТБО.

Наименование образца	Элементный состав, %				
	C ^d	H ^d	N ^d	S ^d	O ^d
Опилки	48,46	5,9	3,65	0	33,37
Резина	65,36	6,39	0,91	1,68	3,96
Кожа	50,45	6,329	10,47	1,15	25,19
Картон	40,59	5,03	0,15	0	32,75
Текстиль	45,39	6,3	0,17	0	38,64
Пластик	84,66	14,28	0	0	1,06

Технические характеристики исследуемых образцов определялись согласно стандартным методам [3] и приведены в таблице 2.

Таблица 2. Технические характеристики исходных образцов ТБО.

Наименование образца	Технические характеристики			
	A ^d , %	W ^a , %	V ^{daf} , %	Q _i , ккал/кг
Опилки	8,62	3,82	82,33	6680
Резина	21,7	0,4	38,97	4389
Кожа	6,41	4,9	81,14	5221
Картон	21,48	3,1	74,87	3404
Текстиль	9,5	2,6	93,96	4228
Пластик	0	0	99,47	10945

Исследование процесса горения проводилось с помощью экспериментального стенда [2], включающего в себя терморегулируемую печь, высокоскоростную видеокамеру и анализатор газофазных продуктов горения.

Лабораторный образец помещался на платформу координатного механизма и водился внутрь топочно-го пространства с температурой 600°C. Видеофиксация процессов воспламенения и горения проводилась с помощью скоростной видеокамеры FASTCAM SA4 5 через смотровое окно муфельной печи. Регистрация газофазных продуктов сгорания осуществлялась с помощью поточного анализатора газофазных продуктов горения Бинар – 1П.

На рисунке 1 представлены кадры скоростной видеосъемки, визуализирующие процессы горения гранул разных видов непищевых ТБО при температуре 600°C.

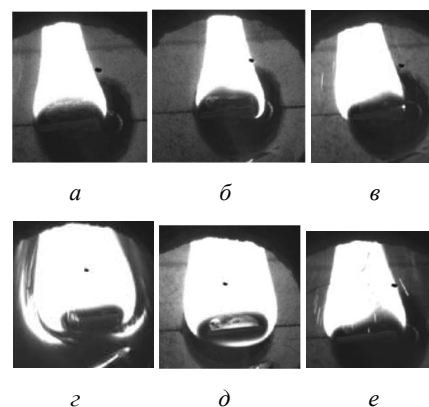


Рис. 1. Процессы горения гранул непищевых ТБО: а – вторичных опилок, б – картона, в – кожи, г – резины, д – пластика, е – текстиля.

На основании полученных данных видно, что с течением времени пребывания гранул в условиях топочно-го пространства в воздушной среде с температурой 600°C отмечается формирование нарастающего факела, что определяется интенсификацией высвобождения летучих веществ с поверхности и внутреннего объема образцов непищевых ТБО.

Список литературы:

1. Фридланд В.С., Лившиц И.М. Твердые бытовые отходы как возобновляемый ресурс: европейский опыт // Теплоэнергетика. 2011. № 1. С. 72–77.
2. Kuznetsov G.V., Yankovskii S.A. Conditions and characteristics in ignition of composite fuels based on coal with the addition of wood // Steam boilers, power-plant fuels, burner units, and boiler auxiliary equipment. 2019. V. 66 (2). P. 133–137.
3. Li Q., Lin Y., Exergy analysis of the LFC process // Proc. International Heat. 2016. V. 108. P.348–354.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, в рамках реализации проекта №13.7644.2017/БЧ

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИТНЫХ ВСТАВОК****Шапеев В.П.^{1,2}, Черепанов А.Н.¹, Исаев В.И.¹**¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича,
630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская 4/1,² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2.

Сварные детали и конструкции из разнородных металлов, ввиду их повышенных эксплуатационных свойств по сравнению с изделиями из однородных металлов, находят широкое применение в производстве космической, авиационной и другой современной техники. Детали и конструкции, изготовленные с комбинированным применением различных металлов, сочетают в себе лёгкость, прочность и высокую коррозионную стойкость. Перспективным способом соединения таких деталей, является лазерная сварка. Она имеет ряд преимуществ перед другими видами сварки: высокую скорость, возможность достижения высокой степени автоматизации, малую деформацию деталей в процессе сварки и гибкость управления процессом. Благодаря этому можно сваривать конструкции различной формы и в разных пространственных положениях. Однако, несмотря на многочисленные исследования в области сварки разнородных металлов, проблема лазерной сварки сплавов на основе алюминия, титана и стали всё ещё мало изучена. Трудности во многом связаны с тем, что в процессе сварки деталей с комбинацией таких сплавов в сварочной ванне, затем при остывании металла в сварочном шве неизбежно образуются различные хрупкие интерметаллиды, которые являются причиной их малой прочности. Например, титан и алюминий – это химически активные металлы, имеющие весьма различные физико-химические и механические свойства. При сварке с проплавлением сплавов титана и алюминия в области сварного соединения образуются хрупкие интерметаллиды типа $TiAl_3$. Также при сварке титана со сталью, ввиду крайней малости растворимости железа в α -титане образуются хрупкие интерметаллические соединения типов $TiFe$, $TiFe_2$, Ti_2Fe и эвтектики различного состава. Для предотвращения образования интерметаллидов при сварке разнородных металлов применяют различные технологические приемы. Одним из эффективных приемов при производстве особо важных деталей является использование промежуточной вставки. Возникает необходимость оптимизации процесса лазерной сварки разнородных металлов. Необходимо выбирать оптимальные мощность лазерного излучения и скорость сварки, оптимальные параметры различных композиционных промежуточных вставок. В вопросе выбора оптимальных параметров сварки дорогостоящий физический эксперимент может быть существенно дополнен и частично заменен расчетами по адекватным математическим моделям, которые дают возможность получить различные количественные характеристики процесса сварки.

В представленной работе предложены численные 3D модели для расчета процесса лазерной сварки

встык пластин из разнородных металлов с использованием композитных вставок, полученных сваркой взрывом тонких слоев из разнородных металлов. Существенным обстоятельством разрабатываемой и моделируемой технологии является то, что сварка взрывом дает прочные соединения разнородных металлов с хорошим качеством сварочных швов и позволяет получить достаточно прочные композитные вставки. Предложено такую технологию применять для сварки пластин из металлов, сварка которых непосредственно друг с другом представляет определенные технологические трудности. Проведено численное моделирование двух случаев сварки. В первом случае моделируется сварка пластин из сплавов стали и титана, во втором случае – пластин из сплавов алюминия и титана. В первом случае использована вставка из слоев стали, меди, ниобия и титана. Во втором – использована вставка из слоев алюминия и титана. В обоих случаях применение промежуточной вставки между свариваемыми металлами предназначено для того, чтобы предотвратить их перемешивание в сварочной ванне и образование хрупких интерметаллидов в сварном шве. Их наличие отрицательно влияет на прочность сварочного шва и всей сваренной конструкции. Расчеты по предложенным моделям позволяют подобрать величины толщины слоев в промежуточной вставке, мощности лазерного излучения и скорости сварки, при которых достигается «кинжальное» проплавление свариваемых стыков. Кроме того, при рассчитанном режиме сварки в сварочных ваннах не происходит смешивание металлов, приводящее к образованию интерметаллидов. И наконец, в процессе сварки устанавливается такое распределение температуры в изделии, при котором не происходит разрушение сварных швов во вставке, полученной сваркой взрывом.

В результате численного моделирования обоих указанных случаев сварки пластин из разнородных металлов получено удовлетворительное согласие результатов расчетов и физического эксперимента.

Список литературы:

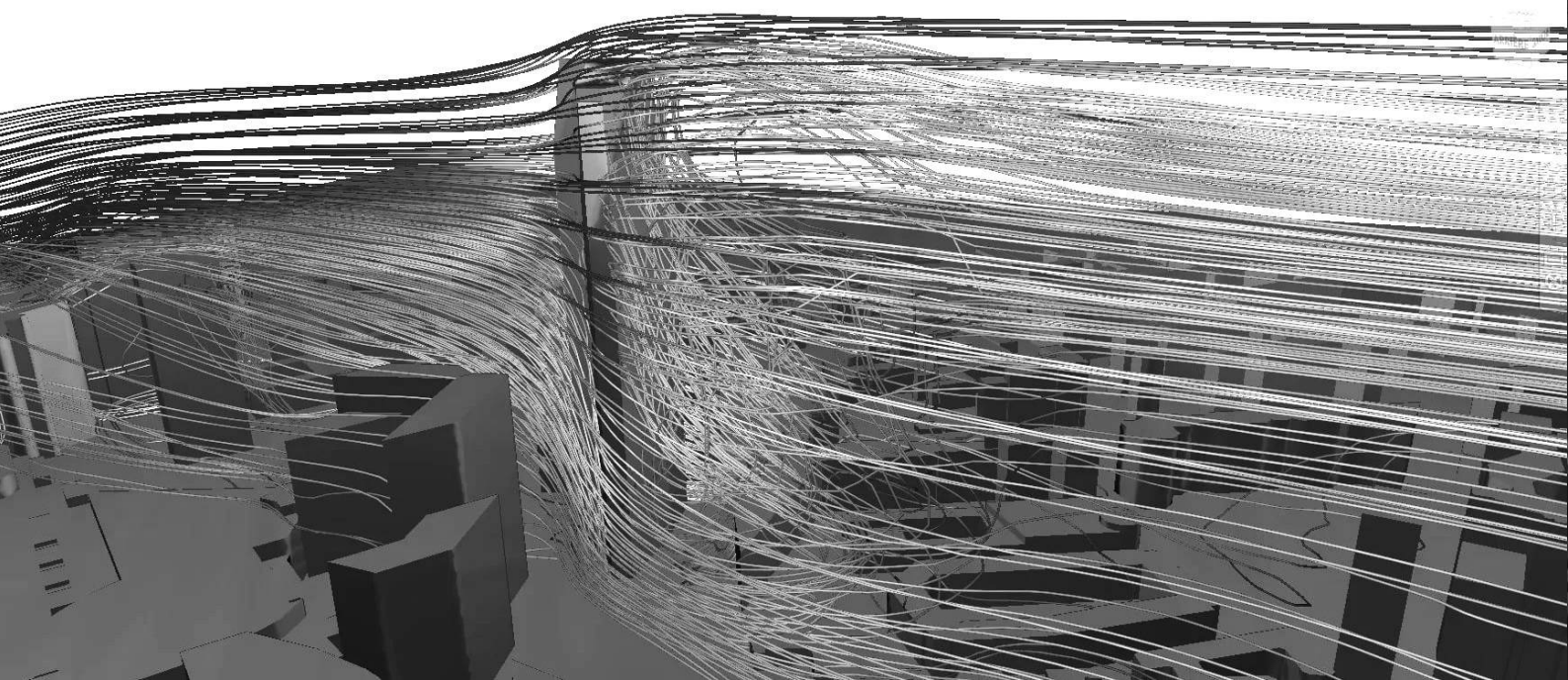
1. Черепанов А.Н., Афонин Ю.В., Оришич А.М. Лазерная сварка стали с титановым сплавом с применением промежуточных вставок и нанопорошковых инокуляторов // Журн. «Тяжелое машиностроение». 2009, №8. С. 24.
2. V. Isaev, A. Cherepanov, V. Shapeev. Numerical study of heat modes of laser welding of dissimilar metals with an intermediate insert. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 99, (2016), pp. 711–720.

*Работа выполнена в рамках Программы
фундаментальных научных исследований
государственных академий наук на 2013-2020 годы
(проект АААА-А17 117030610136-3)*



СЕКЦИЯ 5

Численные методы в теплофизике и физической гидрогазодинамике



МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ LES ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛ ПЛАВУЧЕСТИ

Артемов В.И., Макаров М.В., Минко К.Б., Яньков Г.Г.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., д.14

В настоящей работе исследованы процессы теплообмена при турбулентном подъемном течении жидкости в обогреваемой вертикальной круглой трубе в поле силы тяжести. Моделирование выполнено методом LES с привлечением четырех подсеточных моделей (SGS): Смагоринского с демпфирующей пристеночной функцией Пиомелли (SMP), когерентной (CSM), WALE и модифицированной гибридной модели, основанной на уравнении для турбулентной энергии (KDES) [1]. Расчеты проведены с помощью авторского CFD кода ANES [2]. Результаты сравниваются с данными прямого моделирования (DNS) [3] и надежными экспериментальными данными [4].

Постановка задачи и методология

Задача решалась в приближении стабилизированного течения с периодическими граничными условиями на входе и выходе трубы с использованием авторского алгоритма поддержки постоянного расхода жидкости. На стенках трубы задавалась постоянная плотность теплового потока.

В качестве теплоносителя использовались воздух и вода. Свойства среды принимались постоянными, силы плавучести учитывались в приближении Буссинеска.

Для описания цилиндрической расчетной области использовались неструктурированные декартовы сетки с локальным дроблением и дробными ячейками возле стенки [1]. Длина трубы равнялась 15 диаметрам. По продольной оси z сетка была равномерной с числом ячеек, равным 150. Общее число ячеек сетки составляло 1,4352 млн.

Для получения дискретных аналогов определяющих уравнений использовался метод контрольного объема с аппроксимациями второго порядка точности по времени и пространству.

Результаты и обсуждение

Для верификации LES моделей при отсутствии сил плавучести было рассчитано течение на стабилизированном участке круглой трубы при числе Рейнольдса $Re=19000$. Все четыре SGS модели показали удовлетворительную согласованность с DNS данными. Наилучшие результаты продемонстрировала гибридная KDES модель.

С учетом влияния сил плавучести проведена серия расчетов для воздуха при $Re=5300$, $Pr=0,7$ в диапазоне критерия влияния сил плавучести Bo от 0 до 0,5. Результаты сравнивались с DNS данными [3], результатами расчетов Keshmiri (2012) по модели Смагоринского (SM), экспериментальными данными Parlatan (1996). На рис.1 представлены расчетные числа Nu , отнесенные к значению $Nu_0=18,3$, полученному для вынужденного течения в [3].

Для режимов ухудшенной теплоотдачи наилучший результат показала модель KDES, которая с хорошей точностью предсказывает минимум Nu в зависимости от параметра Bo . Модель SMP дает завышенное значение минимального числа Nu . Для моделей CSM и WALE наблюдается существенный сдвиг минимума в сторону больших чисел Bo (см. рис.1).

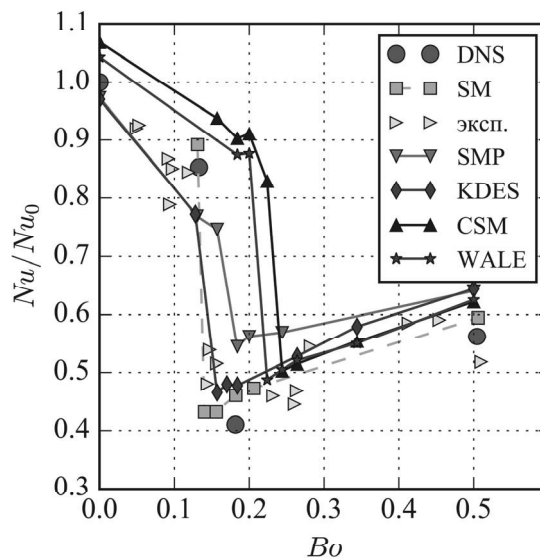


Рис.1. Зависимость Nu/Nu_0 от критерия Bo .

Для воды расчеты были проведены при $Re=7300$, $Pr=5,4$. Полученные результаты по модели KDES показали вполне приемлемое совпадения с экспериментальными данными [4]. Указанная модель хорошо описывает как вязкостно-инерционный режим течения, так и вязкостно-инерционно-гравитационный режим. Для режима ухудшенного теплообмена ($Bo=0,192$) отклонение рассчитанного числа Nu от эмпирической зависимости, предложенной в [4] составила 1,9%. Для модели CSM и WALE обнаружено смещение минимума числа Nu в сторону больших значений Bo .

Список литературы:

1. Артемов В.И., Макаров М.В., Яньков Г.Г., Минко К.Б. Использование гибридной LES/RANS-модели турбулентности для исследования процессов теплообмена при течении жидкости с переменными свойствами в трубах // Труды Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену, М.: Издательский дом МЭИ, 2018, т. 1, с. 137–142.
2. Код ANES [Электронный ресурс]. URL: <http://anes.ch12655.tnweb.ru/> (дата обращения: 10.04.2019).
3. J. You, J. Y. Yoo, H. Choi. Direct numerical simulation of heated vertical air flows in fully developed turbulent mixed convection// Int. J. Heat and Mass Transfer. 2003. V. 46. P. 1613–1627.
4. Петухов Б.С., Стригин Б.К. Экспериментальное исследование теплообмена при вязкостно-инерционно гравитационном течении жидкости в вертикальных трубах. – ТВТ, 1968, Т.6, №5, с. 933–940.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ СТРУЙ НА СНИЖЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ПЛОСКОМ МОДЕЛЬНОМ КАНАЛЕ

Белова В.Г.^{1,2}, Степанов В.А.², Чирков А.Ю.¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

² ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва

e-mail: Belova.V.G@mail.ru

Синтетические струи (С-струи) с нулевым расходом газа применяются для решения различных проблем, связанных с отрывом потока на обтекаемой поверхности, снижением шума, увеличением тепло- и массообмена, уменьшением тепловой нагрузки на отдельные элементы конструкции и др. Устройством для создания С-струй называется генератор синтетических струй (ГСС) [1]. ГСС состоит из замкнутой полости соединенной с окружающей средой с помощью отверстия, через которое последовательно чередуются фазы вдува и отсоса газа, за счет изменения объема внутренней полости. Преимущество применения ГСС заключается в том, что он является независимой системой управления с нулевым расходом газа по времени. Для его работы необходимо только подать энергию для возбуждения колебаний, которые отвечают за изменение объема внутренней полости. В работах [2,3] было показано положительное влияние блоков ГСС на сокращение газодинамических потерь полного давления и снижение теплового потока в переходном канале с отрывным течением.

В данной работе исследуется влияние С-струй на характер распределения теплового потока в плоском модельном канале при изменении расположения блока ГСС со вдувом С-струи по нормали к поверхности через щель размером 0.5 на 35 мм.

Расчет проводился в программном комплексе ESI-ACE+ с описанием газодинамических процессов в полости блоков ГСС в трехмерной постановке с использованием RANS и URANS-методов в сочетании с SST-моделью турбулентности. При расчете использовалась модель реального воздуха с переменной теплоемкостью и температурой набегающего потока 1000K и скоростью 99 м/с. С внешней стороны стальной стенки толщиной 3 мм задавалась температура 500K. Параметрические исследования блока ГСС в модельном канале проводились при изменении его расположения: 1 блок, расположенный поперек канала с амплитудой колебания скорости С-струи 79 м/с и частотой 1 кГц, и 2 блока расположенных вдоль канала на расстоянии 10 мм друг от друга при 79 м/с и 0,9 кГц.

Получены зависимости отношения чисел Стантона St в нестационарной (URANS) и стационарной постановке (RANS) по ширине канала на расстоянии 0.4 м от конца щели блоков ГСС при поперечном расположении одного блока (рис.1а) и продольном двух блоков ГСС (рис.1б). Установление по времени основных параметров течения наблюдается при истечении 20 мс. Выигрыш в уменьшении тепловой нагрузки при работе блоков ГСС составляет 0.5 и 5% в продольном и поперечном расположении соответственно, при осреднении по всей ширине канала за один период работы блока ГСС

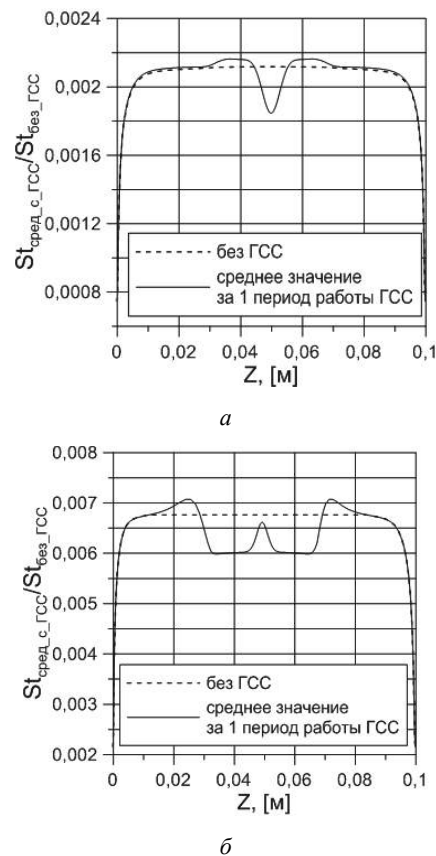


Рис. 1. Зависимость отношения чисел Стантона URANS к RANS по ширине канала на расстоянии 0.4 м от конца щели блоков ГСС при поперечном расположении 1 блока (а) и продольном 2 блоков (б).

С помощью параметрических расчетных исследований был показан характер распространения С-струй в плоском модельном канале при изменении расположения блоков ГСС, а также получено снижение тепловой нагрузки на отдельные элементы конструкции при работе блоков ГСС.

Список литературы:

1. Белова В.Г., Макаров А.Ю., Маслов В.П., Степанов В.А. Проектирование блоков генераторов синтетических струй и экспериментальные исследования нестационарного истечения струй с помощью PIV- метода // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2018. №3. DOI: 10.18698/2308–6033–2018–3-1737.
2. Белова В.Г., Степанов В.А. Многопараметрические расчетные исследования генератора синтетических струй для активного управления течением в переходных каналах // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2018. №4. DOI: 10.18698/2308–6033–2018–4-1742.
3. Belova V G, Stepanov V A, Chirkov A Yu. The effect of synthetic jets on heat fluxes in a transition channel with a characteristic separated flow // Journal of Physics: Conference Series. DOI:10.1088/1742–6596/1129/1/012005.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-08-00271)

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ПРОЦЕСС ТЕПЛООБМЕНА В ПРЕДСОПЛОВОМ ОБЪЕМЕ МНОГОСОПЛОВОГО РДТТ С КАНАЛЬНО-ЩЕЛЕВЫМ ЗАРЯДОМ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЕНИЯ

Бендерский Б.Я., Чернова А.А.

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова,
426000, Россия, Ижевск, ул. Студенческая, 7

Рассматриваются вопросы численного моделирования нестационарной пространственной газодинамики и теплообмена в предсопловом объеме камеры сгорания твердотопливного ракетного двигателя (РДТТ) с канално-щелевым зарядом при движении поверхности массопритока.

Процесс проектирования РДТТ, связан с решением задач оптимизации изделия [1–6]. Учет нестационарности процесса движения поверхности заряда на топологию потока и процессы теплообмена в ПО в литературе не представлен [7–12].

Решена нестационарная пространственная сопряженная задача теплообмена. Используется модель вязкого сжимаемого газа. Для замыкания системы уравнений применена двухпараметрическая модель турбулентности Ментера. Дискретизация расчетной области производилась с использованием призматических элементов (шестигранников), общее количество которых составляло 1800000 элементов.

В результате проведенных расчетов получены мгновенные распределения полей физических величин в проточных трактах и ПО РДТТ. Изучено изменение топологии потока в предсопловом объеме в зависимости от времени. Рассчитаны закономерности изменения коэффициента теплоотдачи на поверхности соплового дна в зависимости от времени.

Выявлено, что перемещение поверхности массопотока приводит к структурной перестройке потока в межщелевом пространстве и вблизи бронированного торца, что изменяет топологию потока вблизи поверхности соплового дна. Показано смещение особых точек и линий. Дана оценка временным режимам существования топологических зон. Проведена оценка изменения тепловых потоков вблизи соплового дна при перестройке потока. Формирование отрывных зон вблизи входа в сопла приводит к увеличению теплового потока в 1,3–1,45 раз. В точке торможения центра соплового дна отмечено существенное увеличение числа Нуссельта.

Показана необходимость дальнейшего исследования задачи в данной постановке, с целью оценки возможности применения полученных результатов для

корректировки критериальных уравнений для расчета числа Нуссельта, полученных для квазистационарного режима работы РДТТ.

Список литературы:

1. С.К. Савельев, В.Н. Емельянов, Б.Я. Бендерский Экспериментальные методы исследования газодинамики РДТТ. – СПб.: «НЕДРА», 2007, 268 с.
2. Дунаев В.А., Евланов А.А. Течение газа в ракетном двигателе твердого топлива с диафрагмой // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып.12. Ч. 1. С. 58–63.
3. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Газовые течения с массоподводом в каналах и трактах энергоустановок. 2011. М: ФИЗМАТЛИТ. 464 с.
4. Бендерский Б.Я., Саушин П.Н., Чернова А.А. Пространственная газовая динамика в узлах энергетических установок летательных аппаратов // Вестник казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2011. №1. С. 8–11.
5. Алиев А.В., Мищенко О.В., Черепов И.В. Нестационарные внутрикамерные процессы в твердотопливных регулируемых двигательных установках // Вестник московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: машиностроение. 2016. Т. 4 (109). С. 24–39.
6. Липанов А.М., Бобрышев В.П., Алиев А.В., Спиридонов Ф.Ф., Лисица В.Д. Численный эксперимент в теории РДТТ. Екатеринбург: УИФ Наука. 1994. 300 с.
7. Анисимов В.А., Волков К.Н., Денисихин С.В., Емельянов В.Н. Моделирование задач внутренней баллистики энергоустановок средствами современных вычислительных пакетов. // Химическая физика и мезоскопия. 2006г. Том 8, №3, с.327–335.
8. Бендерский Б.Я., Тенев В.А. Пространственные дозвуковые течения в областях со сложной геометрией // Математическое моделирование. 2001. Т. 13, № 8. С. 121–127.
9. Глебов Г.А., Высоцкая С.А. Моделирование когерентных вихревых структур и автоколебаний давления в камере сгорания РДТТ // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2016. №4 С. 18–25.
10. Глебов Г.А., Высоцкая С.А. К вопросу о влиянии геометрии канала заряда и свойств топлива на неустойчивость рабочего процесса в камере РДТТ // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2017. №1. С. 8–16.
11. Бендерский Б.Я., Чернова А.А. Формирование вихревых структур в каналах массоподвода и их взаимодействие с поверхностями в РДТТ // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 2. С. 195–200.
12. Бендерский Б.Я., Чернова А.А. Особенности теплообмена в предсопловом объеме РДТТ с зарядами сложной формы // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 2. С. 277–284.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ СИСТЕМЫ ВНУТРИЦИКЛОВОГО СЖАТИЯ ТОПЛИВА****Борисов Ю.А.^{1,3}, Пугачук А.С.^{1,3}, Синкевич М.В.^{1,2}, Халифе Х.²**¹ Объединенный институт высоких температур РАН,
125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13с.2² Российский Университет Дружбы Народов,
117198, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6³ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, с. 1

При разработке новых газотурбинных установок (ГТУ) особое внимание уделяется повышению их КПД. Самым распространенным путем повышения КПД подобных установок является повышение начальных параметров рабочего тела ГТУ: температуры газа перед турбиной и степени сжатия в компрессоре. Однако при этом часто забывают о повышении затрат энергии на работу периферийного оборудования. Одним из примеров такого оборудования являются дожимные компрессорные станции (ДКС), предназначенные для подачи топливного газа в камеру сгорания ГТУ.

Объединенный институт высоких температур РАН совместно с ПАО «Научно-производственным объединением «Алмаз» на примере ГТУ-2,5П рассмотрели возможность использования вместо ДКС установки внутрициклового сжатия топлива на основе топливного компрессора-регулятора [1]. В качестве привода компрессора-регулятора в данной установке была разработана радиальная паровая турбина, которая при номинальной частоте вращения (87000 об/мин) вырабатывает 60 кВт. Источником энергии, приводящим турбинное колесо во вращение, является пар с давлением 2 МПа и расходом 0,4 кг/с.

Характеристики спроектированной ступени при различных режимах работы получены с использованием численных методов с применением вычислительного программного комплекса ANSYS CFX. При проведении расчетов рабочая область разбивалась на контрольные объемы с «загущением» сетки вблизи границ для учета влияния пограничного слоя. Перетечками пара через зазор между рабочим колесом и корпусом турбины в расчете пренебрегали. В результате расчета было определено, что КПД спроектированной турбины превышает 83% при степени расширения от 1,6 до 2,0.

Для проверки адекватности составленной математической модели процессов, протекающих в турбине,

и полученных результатов расчета необходимо проведение экспериментальных исследований. Однако испытание данной турбинной ступени (с последующей её доработкой) достаточно затратно и длительно. Поэтому предложено испытывать полноразмерный макет турбины в модельных условиях с использованием разработанного в ОИВТ РАН стенда физического газодинамического эксперимента.

При проведении подобных испытаний в качестве макетов элементов лопаточных машин используются полноразмерные модели, изготовленные с применением аддитивных технологий из современных пластмасс [2]. Прочностные характеристики этих материалов не позволяют работать при высоких окружных скоростях. В связи с этим частота вращения турбинного колеса выбирается в соответствии с пределом прочности данных материалов. При этом необходимо сохранить равенство критериев подобия (чисел Маха и Рейнольдса) при модельных и физических условиях. Для этого необходимо понизить температуру (тем самым уменьшая местную скорость звука и вязкость рабочего тела) и давление (тем самым уменьшая плотность).

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены характеристики работы турбины в широком диапазоне степени расширения (от 0 до 2,0) которые показали хорошее совпадение с результатами численного исследования.

Список литературы:

1. L. E. Vendland, V.G. Pribylov, Yu.A. Borisov, M.A. Arzamastsev, A.A. Kosoy Simulation modelling for new gas turbine fuel controller creation // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 891. P. 012260.
2. Belova O.V., Borisov Yu.A. Prospects of application of additive technologies for increasing the efficiency of impeller machines // AIP Conference Proceedings. 2017. V. 1876. P. 010036.

Гиль А.В.¹, Саломатов В.В.², Пузырев Е.М.³¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1³ Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 656038, Россия, Барнаул, пр. Ленина, 46

Согласно наметившимся тенденциям и мнениям ряда экспертов, будущее тепловой энергетики будет связано с внедрением котельных агрегатов с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС), которые позволяют организовывать эффективное сжигание высокозольных и влажных топлив.

В настоящее время мировой опыт эксплуатации котлов с ЦКС очень богат. За годы использования ЦКС в энергетике удалось серьезно уменьшить металлоемкость, совершенствовать различные конструктивные решения, повысить надежность и экономичность.

Несмотря на успешный опыт эксплуатации котлов с ЦКС в мировой энергетике, в России отсутствуют нормативные методики расчета и малоизучены газодинамические процессы в топочных камерах с ЦКС.

На современном этапе научных исследований вычислительный эксперимент является одним из важных направлений при изучении задач аэродинамики, теплообмена и горения.

На сегодняшний день, моделирование с применением методов вычислительной газодинамики обычно ограничено 2-х мерной геометрией, для которой поток частиц моделируется с использованием стандартного многожидкостного подхода Эйлера-Эйлера, но для большего понимания процессов, происходящих в котлах с ЦКС, необходимо применять трехмерное моделирование [1]. Однако, из-за высокой вычислительной сложности, лишь несколько зарубежных исследований, доступных в открытых источниках, посвящены полному циклу трехмерного моделирования промышленных котлов с ЦКС [2–4].

Объектом исследования является стенд для холодного и огневого изучения процессов в циркулирующем кипящем слое. Стенд разработан с учетом имеющегося опыта и включает ряд заложенных в его конструкцию новых технических решений. Водохлаждаемую воздухораспределительную решетку с циркуляцией в придонном слое, систему сопел вторичного дутья, газоотводящее окно, обеспечивающее внутритопочную циркуляцию частиц, дожигание выхлопа и др.

В качестве топлива для моделирования топочных процессов принят бурый уголь Шивэ-Овооского месторождения Монголии.

Математическое моделирование процессов в данной работе основано на Эйлерово-Лагранжевом подходе. Турбулентные характеристики газа рассчитываются с использованием двухпараметрической «к-ε» модели турбулентности, также учитывающей влияние движущихся частиц. Радиационный теплообмен в двухфазном потоке представляется в рамках P1 приближения [5].

На рисунке 1 представлены результаты трехмерного численного моделирования организации сжигания угля Шивэ-Овооского месторождения.

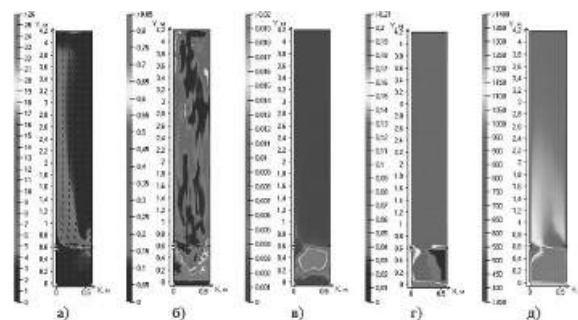


Рис. 1 Результаты математического моделирования в вертикальном сечении по поперечной оси: а) аэродинамическая структура, м/с; б) концентрация частиц, кг/м³; в) концентрация CO, %; г) концентрация O₂, %; распределение температур, К.

Анализируя результаты моделирования в первую очередь отмечено то, что в процессе вариантных исследований получены трехмерные функциональные зависимости качественно и адекватно описывающие и представляющие процессы организации сжигания в топочной камере с ЦКС.

Высокое качество результатов моделирования свидетельствует о правильности подходов и примененных численных алгоритмов при разработке и оптимизации математической модели для численного анализа процессов переноса и горения низкокачественных и низкорекреационных монгольских углей.

Список литературы:

1. Wojciech P. Adamczyk, Gabriel Weceł, Marcin Klajny, Paweł Kozołub, Adam Klimanek, Ryszard A. Bialecki Modeling of particle transport and combustion phenomena in a large-scale circulating fluidized bed boiler using a hybrid Euler-Lagrange approach // Particuology. – 2014, vol. 16, P. 29–40
2. Myohanen, K., & Hyppanen, T. A three-dimensional model frame for modelling combustion and gasification in circulating fluidized bed furnaces // International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2011, vol. 9, Iss. 1.
3. Wischniewski, R., Ratschow, L., Hartge, E.U., & Werther, J. Reactive gas-solids flows in large volumes-3D modeling of industrial circulating fluidized bed combustors // Particuology. – 2010, vol. 8, Iss. 1, P. 67–77.
4. Zhang, N., Lu, B., Wang, W., & Li, J. Virtual experimentation through 3D full loop simulation of a circulating fluidized bed // Particuology. – 2008, vol. 6, Iss. 6, P. 529–539.
5. Гиль А.В., Старченко А.В. Математическое моделирование физико-химических процессов сжигания углей в камерных топках котельных агрегатов на основе пакета прикладных программ FIRE 3D // Теплофизика и аэромеханика, 2012. – том 19, № 5.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-58-44020)

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

² Новосибирский государственный университет,
630073, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

SPH-метод (метод сглаженных гидродинамических частиц) [1] относится к чисто лагранжевым методам и позволяет провести численное исследование течения жидкости в сильно деформирующейся области, в частности при разлете или разрушении среды. В этих случаях необходимо использовать многофазные модели, поскольку при разлете средняя плотность среды уменьшается, и появившейся свободный объем должна занять газовая фаза.

Концентрацию газовой фазы k можно учитывать через среднюю плотность среды ρ следующим образом:

$$k = \begin{cases} 0, & \rho \geq \rho_0 \\ 1 - \rho / \rho_0, & \rho < \rho_0 \end{cases}$$

где ρ_0 – плотность чистой жидкости при начальном (атмосферном) давлении ρ_0 .

В подобном подходе отсутствует собственно динамика газовой фазы, которая может играть большую роль при декомпрессии среды, или иметь свои особенности, связанные с конкретными условиями.

В качестве примера можно привести процесс вулканического извержения, в котором в первоначально сжатой газонасыщенной магме происходит дегазация, образуются и растут пузырьки, но их рост существенно зависит от вязкости. Возможна ситуация при которой рост пузырьков практически прекращается, несмотря на продолжающееся разрушение среды. Следовательно в этом случае необходимо отдельно учитывать динамику газовой фазы.

В SPH-методе с каждой частицей связано некоторое количество моделируемой среды, будем полагать в частице также имеется некоторое количество пузырьков газа с радиусом R . Уравнение состояния среды представляет собой широко распространенное для SPH метода уравнение Тэта, которое с учетом концентрации газовой фазы записывается в следующем виде:

$$p = p_0 + B \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0(1-k)} \right)^n - 1 \right)$$

Данная модель известна как модель Иорданского-Когарко-ван Вингаардена [2].

Динамика газовой фазы при малых концентрациях, когда пузырьки можно считать сферическими, может быть описана уравнением Рэлея-Плессета. При больших концентрациях будем полагать что давления в газовой и жидкой фазах выровнялись и использовать инерционные соотношения.

При таком подходе параметры, связанные с газовой фазой могут быть вычислены разными способами. Во-первых, в соответствии с используемой моде-

лью динамики газовой фазы, а во вторых значение любой функции, заданной в SPH частицах, вычисляется в соответствии с интерполяционной формулой метода:

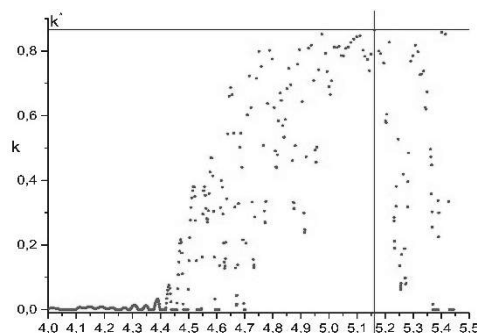
$$f(\bar{r}) = \int f(\bar{r}') W(\bar{r} - \bar{r}', h) d\bar{r}',$$

где W – сглаживающее ядро, h – ширина ядра.

В работе, на модельной задаче о декомпрессии жидкости с микропузырьками газа, рассматриваются оба данных подхода.

В начальный момент времени правая граница жидкости, находящейся при высоком давлении, становится свободной и по жидкости распространяется волна декомпрессии. Также на свободной границе жидкость приобретает скорость и начинается разлет среды. Динамика газовой фазы рассчитывается по модели ИКВ, и по достижению критической концентрации, рассчитывается по инерции.

Процесс разлета приводит к сильному разрежению частиц и образованию промежутков между ними. С точки зрения метода это соответствует уменьшению числа соседей у каждой частицы.



На рисунке показано облако разреженных частиц на правой границе области, линия соответствует положению частицы без соседей в области сглаживания. Это означает, что среда потеряла связность, а плотность в этой частице соответствует минимально возможной плотности. Что, в свою очередь, означает достижение предельной концентрации, хотя разлет среды продолжается, и дальнейший расчет динамики газовой фазы возможен по инерционной модели.

Список литературы:

1. Monaghan J.J Smoothed particle hydrodynamics // Reports on Progress in Physics, 2005, 8, v.68, 1703–1759.
2. Когарко Б.С. Одномерное неустановившееся движение жидкости с возникновением и развитием кавитации // Докл. АН СССР, 1964, № 4, Т. 155, 779–782.

*Работа выполнена при поддержке
гранта РФФИ 19-08-01010*

АНАЛИЗ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ АССИМИЛЯЦИИ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОЛЕННОСТИ В ЛЕТНИЙ СЕЗОН 2016 ГОДА**Демышев С.Г., Евстигнеева Н.А., Дымова О.А.**Морской гидрофизический институт РАН,
299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2

С 2016 г. Морской гидрофизический институт (МГИ) возобновил экспедиционные исследования на больших участках акватории Черного моря, в задачи которых входит получение экспериментальных данных о вертикальном и пространственном распределении гидрологических характеристик. Целью данной работы является реконструкция с высоким пространственным разрешением трехмерных гидрофизических полей Черного моря на основе усвоения в гидродинамической модели данных температуры и солёности. Для анализа была выбрана гидрологическая съемка 87 рейса НИС «Профессор Водяницкий», выполненная в северной части Черного моря в летний сезон 2016 г. В ходе экспедиции в период с 30 июня по 18 июля было выполнено 125 станций. Максимальная глубина, до которой проводились зондирования, изменялась от 30 до 1700 м.

Система уравнений численной модели МГИ [1] в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды представлена в форме Громеки-Лэмба. Конечно-разностная дискретизация уравнений модели, начальных и граничных условий проведена на сетке С. Процедура ассимиляции данных наблюдений основана на фильтре Калмана с учетом неоднородности и неізотропности оценок полей температуры и солёности. В начальный момент времени ковариационные функции принимались равными ковариационным функциям самого поля (то есть дисперсия ошибок оценок полей температуры, солёности была равна единице). Адвективные слагаемые уравнений переноса-диффузии дисперсий ошибок прогноза аппроксимировались с помощью TVD-схем.

Расчеты проводились на горизонтальной сетке $1,64 \times 1,64$ км, по вертикали использовалось 27 горизонтов. Шаг по времени выбран 96 с. Коэффициенты турбулентного обмена импульсом и диффузии по вертикали рассчитывались в соответствии с параметризацией Меллора-Ямады 2.5, учитывался сток рек и водообмен через проливы. Выбор коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии по горизонтали и коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии дисперсии ошибок проводился на основе серии специализированных численных экспериментов.

На основе анализа статистической структуры полей измеренной температуры и солёности и по результатам численных экспериментов подобраны параметры для процедуры ассимиляции. Ковариационные функции полей T , S аппроксимировались функцией экспоненциального типа. Общее время интегрирования уравнений модели – 21 день (с 28 июня по 18 июля 2016 г.). Для задания начальных условий задачи использовались полученные в предыдущих расчетах поля течений, температуры, солёности для 28 июня 2016 г. с разрешением 1,64 км. На поверхности моря задавались поля тангенциального напряжения трения ветра, потоки тепла, коротковолновой радиации, осадков и испарения, полученные по дан-

ным реанализа модели греческого центра атмосферных прогнозов SKIRON (1/10°).

В начальный момент времени в поле течений наблюдался антициклонический вихрь с радиусом около 25 км у юго-восточного берега Крыма, один циклонический и два антициклонических вихря с радиусами около 30 км в западной части области (пролеживались до глубины 100 м). Максимальная скорость до 52 см/с (в верхнем слое) достигалась в центральной части, вдоль западного берега Крыма отмечено течение, направленное на север. В восточной части области наблюдалось две динамические зоны: прибрежная зона с антициклонической завихренностью течений и зона циклонической завихренности в глубоководной части моря. В верхнем слое фиксировались циклонические вихревые образования в Каламитском и Каркинитском заливах с радиусом около 10 км.

Вихрь вблизи г. Ялта формировался квазипериодически (время жизни 5–6 дней) и перемещался по направлению движения Основного черноморского течения (ОЧТ), возможный механизм формирования – сдвиговая неустойчивость (течение на шельфе направлено на северо-восток, а в глубоководной части моря – на юго-запад). Существование полученных вихрей не противоречило спутниковым наблюдениям за поверхностной температурой.

В течение всего расчета наблюдался интенсивный поток струи ОЧТ вдоль Крымского побережья, направленный на запад и северо-запад, максимальная скорость которого достигала 50 см/с на верхнем горизонте, радиус антициклонического вихря вблизи г. Севастополь увеличивался до 40 км. С 9 июля скорость ОЧТ ослабевала до 40 см/с, в Каламитском заливе и вдоль побережья генерировались антициклонические вихри с радиусом около 15 км, в западной части области – антициклонический вихрь с радиусом около 30 км, в восточной глубоководной части области – циклонические вихри с радиусом 30 км.

В течение расчетного периода наблюдались также вихри малых масштабов различного знака вращения в верхнем слое на северо-западном шельфе и около побережья Крыма. Скорости не превышали 20 см/с, время жизни 2–3 дней. Возможный механизм формирования – набегание течения на неровности береговой линии и рельефа дна.

Список литературы:

1. Демышев С.Г. Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 48. – № 1. – С. 37–149.

Исследование проведено в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0002 (шифр «Оперативная океанология») и при поддержке РФФИ (грант № 18-05-00353)

ВЛИЯНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ НА ПОТОКИ КОМПОНЕНТОВ МОРСКОЙ ЭКОСИСТЕМЫ С ШЕЛЬФА В ГЛУБОКОВОДНУЮ ЧАСТЬ ЧЕРНОГО МОРЯ

Дорофеев В.Л., Сухих Л.И.

Морской гидрофизический институт РАН,
29901, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2

Одним из источников биогенов, поступающим в верхний слой Черного моря, является сток рек. Большая часть этого стока приходится на северо-западный шельф (СЗШ), занимающий 16 процентов площади моря. Богатые биогенами воды СЗШ проникают в глубоководную часть моря благодаря течениям. В данной работе исследуется зависимость величины потоков биогенов между СЗШ и глубоководной частью Черного моря от характера циркуляции.

Для изучения процессов переноса используются поля течений и параметров морской экосистемы на регулярной сетке, полученные в результате реанализа. Междисциплинарная модель экосистемы Черного моря состоит из двух основных блоков: модели циркуляции и биогеохимической модели, описывающей взаимодействия между различными компонентами морской экосистемы. Применявшиеся в исследовании поля течений Черного моря представляют собой результат физического реанализа для двадцатилетнего периода (с 1993 по 2002 годы) [1]. Основой реанализа является *z*-уровневая модель, основанная на аппроксимации системы примитивных уравнений динамики океана [2]. Используемый вариант модели имеет горизонтальный пространственный шаг сетки 4.8 км и 35 вертикальных расчетных уровней. Такое пространственное разрешение позволяет достаточно адекватно описывать, помимо крупномасштабных, синоптические процессы в Черном море. В качестве граничных условий на свободной поверхности моря для уравнений модели циркуляции использовались параметры атмосферного воздействия, полученные по результатам атмосферного реанализа *ERA-Interim (ECMWF)*: приповерхностный ветер, потоки тепла и пресной воды, солнечная радиация.

При получении гидродинамических полей, использовавшихся в работе, применялась ассимиляция в модели циркуляции Черного моря данных спутниковых измерений температуры поверхности моря (ТПМ), аномалий уровня и среднегодовых профилей температуры и солёности. Температура поверхности моря бралась из архива *GHRSSST* и *NODC*, а для последнего периода – из архива *OSI TAC*. Для ассимиляции данных об аномалии уровня моря использовались все доступные данные спутниковой альтиметрии за период реанализа, представленные архивами *NASA*, *AVISO* и *SL TAC*. Среднегодовые профили температуры и солёности были подготовлены на основе всех имеющихся за рассматриваемый период данных гидрографических съёмок и всплывающих буев.

Биогеохимический блок модели экосистемы Черного моря включает в себя 15 переменных состояния и описывает процессы в верхнем 200-метровом слое моря. Шаг по пространству и расчетные горизонты соответствуют модели циркуляции. Временная эволюция компонентов экосистемы описывается урав-

нениями переноса–диффузии, включающими в правой части слагаемые типа источников–стоков, описывающих взаимодействие между компонентами экосистемы. В местах устьев крупных рек задавались потоки питательных веществ, пропорциональные их концентрации и интенсивности речного стока. Важной особенностью биологической части реанализа является ассимиляция данных измерений спутниковых цветковых сканеров. Эти данные представляют собой двухнедельные поля поверхностной концентрации хлорофилла-*a*, подготовленные на основе продуктов *SeaWiFS*, *MODIS* и *MERIS* по разработанному специально для Черного моря алгоритму. Для проверки качества результатов реанализа была проведена их валидация, показавшая, что полученные поля достаточно хорошо описывают реальную термohалинную и биогеохимическую структуру моря.

На основе полей течений, полученных в физическом реанализе были посчитаны потоки различных компонентов экосистемы с шельфа в глубоководную часть моря. Основной поток осуществляется через поверхность, проходящую вдоль изобаты 200 м и через зональное сечение возле мыса Калиакра. Наибольшие значения потоков наблюдаются в зимнее время, когда концентрация биогенов и фитопланктона в верхнем слое моря максимальны. При этом величина потоков существенно меняется для разных лет. Эта межгодовая изменчивость вызвана в первую очередь характером циркуляции. Основным элементом зимней циркуляции в Черном море является, как правило, интенсивное Основное черноморское течение (ОЧТ), стрежень которого проходит вдоль свала глубин. Такое течение затрудняет поперечный обмен между шельфовой и глубоководной частями моря. В то же время, поток через зональное сечение у мыса Калиакра имеет максимальные значения при интенсивном ОЧТ. В некоторые сезоны интенсивность ОЧТ падает, и оно разбивается на ряд вихрей. При наличии таких вихрей у кромки СЗШ наблюдается повышенный перенос в направлении поперек изобат. Перенос же через зональное сечение в этом случае падает. Таким образом, вынос биопродукции и биогенов с СЗШ в центральную часть Черного моря существенно зависит от характера течений в поверхностном слое Черного моря.

Список литературы

1. Дорофеев В.Л., Сухих Л.И. Моделирование долговременной эволюции гидрофизических полей Черного моря // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 6. С. 871–884.
2. Демьшев С.Г., Кортаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке *C* // *Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане*. М.: ИВМ РАН, 1992. С. 163–231.

Работа поддержана РНФ (грант № 17-77-30001)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА НА СКОЛЬЗЯЩЕМ КРЫЛЕ В ДОЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Кириловский С.В.¹, Бойко А.В.^{1,2}, Демьянко К.В.^{1,3}, Иванов А.В.¹, Нечепуренко Ю.М.^{1,3}, Поплавская Т.В.¹

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

² Тюменский государственный университет, 625003, Россия, Тюмень, ул. Володарского, 6

³ Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука, 119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 8

При проектировании современных летательных аппаратов необходимо учитывать положение и протяженность ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП), т.к. наличие турбулентного обтекания влияет на аэродинамическое сопротивление летательного аппарата в целом и ведёт к необходимости больших затрат топлива в ходе полёта.

Целью данной работы является определение положения ЛТП в условиях обтекания трехмерных аэродинамических конфигураций (в частности, скользящего крыла) на дозвуковых скоростях. Именно на модели скользящего крыла с ненулевым углом стреловидности возникают такие аспекты ЛТП как поперечное течение с градиентом давления и возможностью отрыва, и в зависимости от угла атаки на такой модели может возникать как неустойчивость Толлмина-Шлихтинга, так и неустойчивость поперечного течения (Cross-Flow) вследствие разворота потока вдоль хорды крыла. Экспериментальные исследования неустойчивости поперечного течения и волн Толлмина-Шлихтинга в оторвавшемся или присоединенном пограничном слое на модели 45-градусного скользящего крыла (Рис.1) проводились в аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН. Данная работа направлена на численное моделирование ЛТП на представленной модели скользящего крыла. Расчётная область представляла собой параллелепипед и повторяла форму рабочей камеры аэродинамической трубы Т-324 ИТПМ СО РАН. Сечение скользящего крыла соответствует ламинаризованному крыловому профилю NASA 67 1–215 (см. Рис.1).



Рис. 1 Модель скользящего крыла в рабочей части Т-324.

Для определения границы, разделяющей области ламинарного и турбулентного течения в пограничном слое, применяются инженерные методы предсказания перехода, основными требованиями к которым должны быть простота и надежность. Наиболее популярная в настоящее время инженерная эмпирическая модель перехода Transition SST, встроенная в пакет ANSYS Fluent, калибровалась только для дозвуковых несжимаемых двумерных течений, и для трехмерных течений эта модель ЛТП нуждается в валидации. Поэтому в данной работе прогноз положения перехода выполнялся с использованием блока ЛТП LOTRAN 3.0, созданного на основе физически

обоснованного метода переменного N -фактора (e^N -метод) с использованием оригинальных специализированных матричных алгоритмов для прогнозирования ЛТП в вязких сжимаемых трехмерных течениях. Проведена работа по интеграции блока ЛТП в газодинамический пакет ANSYS Fluent, с помощью которого выполняется численное моделирование ламинарного течения на основе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса. Полученные данные основного течения конвертируются во внутреннее представление блока ЛТП с помощью специально созданного модуля экспорта данных. На рис. 2 представлено распределение коэффициентов давления на поверхности крыла вдоль продольной координаты (вдоль середины расчётной области), согласующееся с экспериментальными данными.

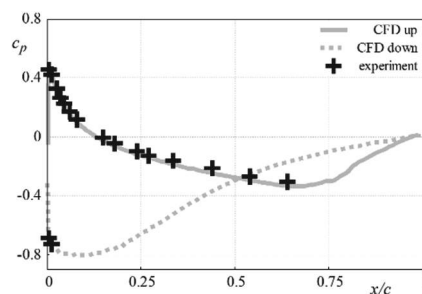


Рис. 2 Распределение коэффициента давления c_p вдоль продольной координаты в центральной плоскости для наветренной и подветренной стороны крыла полученные в численном моделировании и в трубных экспериментах: $U_\infty=30\text{ м/с}$, $Re_l=1.91 \times 10^6 \text{ 1/м}$, $\alpha=-5^\circ$.

В работе на примере задачи пространственного обтекания скользящего крыла показано, что на такой модели реализуется благоприятный градиент давления, что приводит к доминированию (рис. 2 и рис. 3) сценария ЛТП Cross-Flow. Показано, что разработанные для вязких сжимаемых трехмерных пограничных слоев оригинальный блок ЛТП LOTRAN 3.0 дает адекватный прогноз положений начала и конца ЛТП.

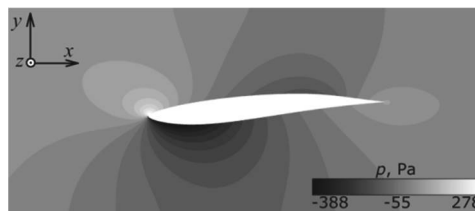


Рис. 3 Поле давления в центральной плоскости вблизи крыла: $U_\infty=30\text{ м/с}$, $Re_l=1.91 \times 10^6 \text{ 1/м}$, $\alpha=-5^\circ$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00460)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛА ЖИДКИХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ ELSA МОДЕЛИ

Кузнецов В.А.^{1,2}, Минаков А.В.^{1,2}, Шебелев А.В.^{1,2}, Дектерев А.А.^{1,2}

¹ Сибирский федеральный университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Распыливание жидкости широко применяется в современной технике [1–4]. Чрезвычайно важное место распыливание занимает в энергетике, при сжигании жидких топлив. Способы сжигания весьма разнообразны. Однако для всех способов обязательной является стадия распыливания топлива, ибо оно, многократно увеличивая суммарную поверхность контакта сред, усиливая теплообмен измельченного топлива с газовой средой и улучшая перемешивание частиц горючего с окислителем, существенно способствует интенсификации процесса горения.

В настоящее время в мире активно проводятся исследования перспективных суспензионных альтернативных топлив для производства энергии, которые состоят из воды, измельченного угля или горючего отхода его переработки, химических добавок, а также отходов нефтепереработки. Такие топлива называют органоводоугольными (ОВУТ) [5–7]. Отходы угледобычи и обогащения углей обладают достаточно высокой теплотворной способностью, однако их широкое энергетическое использование сдерживается из-за отсутствия энергоэффективных и экологически безопасных технологий, создание которых требует проведения комплексного научного исследования. Для управления процессом распада жидких топлив, получения зависимостей угла раскрытия факела и дисперсного состава топлива от геометрических характеристик форсунки необходимы экспериментальные и расчетные исследования.

Огромное значение распыливания жидких топлив для решения широкого ряда технических задач привело к созданию большого количества всевозможных конструкций форсунок, отвечающих специфическим требованиям решаемых задач. Эффективность работы пневматической форсунки для распыла ОВУТ определяется организацией газовых потоков. В связи с этим стоит задача разработки эффективной и достоверной численной методики для описания распыла жидких топлив в перспективных горелочных устройствах.

Проведенный анализ литературы показал, что на сегодняшний день наиболее реалистичные результаты по моделированию первичного распыла при приемлемых вычислительных затратах получаются при помощи эйлерово-лагранжевой модели распыла ELSA (Euler Lagrangian Spray Atomization) [8–12].

Целью работы является разработка численной методики для моделирования первичного и вторичного распыла жидкостей на основе модели ELSA.

Для численного моделирования распыливания жидкого топлива использовалась эйлерово-лагранжевая модель первичного и вторичного распыла. Данная модель описывает поток жидкости внутри

сопла и непосредственно за соплом при помощи подхода Эйлера, а образующуюся на удалении от сопла дисперсную среду при помощи подхода Лагранжа. Описание переходной области двухфазного потока между сплошной и дисперсной средой и организации взаимного пересечения в этой области подходов Эйлера и Лагранжа. Решение построено на основе известных эмпирических данных и аппроксимации DNS моделирования для двухфазных струй.

Сравнительный анализ результатов расчета показал приемлемое согласие с данными других авторов и экспериментальными результатами, по основным характеристикам распыла и могут быть полезны для оценок, поскольку позволяют качественно верно определять структуру двухфазного потока, параметры и размер капель, скорость и направление их движения.

Список литературы:

1. Lightfoot, M. D. A., A Fundamental Classification of Atomization Processes, OMB No. 0704-0188, 2008.
2. M. Ghiji, L. Goldsworthy, V. Garaniya, P.A. Brandner, and P. Hield, CFD Modelling of Primary Atomisation of Diesel Spray, 19th Australasian Fluid Mechanics Conference, Melbourne, Australia, 8–11 December 2014.
3. L. Bravo et. al., Numerical Investigation of Liquid Jet Breakup and Droplet Statistics with Comparison to X-ray Radiography, Propulsion and Energy Forum, July 25–27, 2016, Salt Lake City, UT.
4. Lasheras J.C., Villermaux E., Hopfinger E.J., “Break-up and atomization of a round water jet by a high-speed annular air jet,” – J. Fluid Mech. (1998), vol. 357, pp. 351–379.
5. Горлов Е.Г., Серегин А.И., Ходаков Г.С. Условия реализации шламов угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий в виде суспензионного топлива // Химия твердого топлива. 2007. №6. С. 51–57.
6. Патраков Ю.Ф., Федорова Н.И., Ефремов А.И. Композиционное водосодержащее топливо из низкосортных углей Кузбасса // Вестник Кузбасского ГТУ. 2006. № 3. С. 81–83.
7. Архипов В.А., Сидор А.М., Сурков В.Г. Исследование физико-химических и энергетических характеристик органоводоугольных топлив // Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. 2013. № 5. С. 39–47.
8. Vallet A, Burluka AA and Borghi R (2001) Development of a Eulerian model for the atomization of a liquid jet. Atomization and sprays, vol. 11, pp. 619–642.
9. Beau PA (2006) Modelisation de l'atomisation d'un jet liquide - Application aux sprays diesel. Ph.D. Thesis, University of Rouen.
10. De Luca M, Vallet A and Borghi R (2009) Pesticide atomization modeling for hollow-cone nozzle. Atomization and sprays, vol. 19(8), pp. 741–753.
11. Ning W, Reitz RD, Diwakar R and Lippert AM (2009) An Eulerian-Lagrangian spray and atomization model with improved turbulence modeling. Atomization and sprays, vol. 19(8), pp. 727–739.
12. Desportes A, Zellat M, Desoutter G, Liang Y and Ravet F (2010) Application of the Eulerian-Lagrangian spray atomization (ELSA) model for the Diesel injection simulation. Proc. THIESEL 2010, Valencia, Spain, pp. 139–150.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке
РФФИ в рамках научных проектов
№ 18-29-24007-мк и № 18-38-00594-мол_а*

ГЕМОДИНАМИКА ДЕСТРУКТИВНЫХ НЕЙРОХИРУРГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ: МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕРЕБРАЛЬНЫХ СОСУДОВ С АНЕВРИЗМОЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОБХОДНОГО АНАСТОМОЗОА

Куянова Ю.О.^{1,2}, Паршин Д.В.^{1,2}

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

В настоящее время при лечении различных сосудистых патологий, таких как сосудистые стенозы, аневризмы, болезнь Мойя-Мойя и др., широкое распространение среди нейрохирургов получила техника формирования обходных сосудистых анастомозов (или байпасов). Сосудистый анастомоз – это соединение обычно раздельных ветвей сосудов. При лечении церебральных аневризм (патологических расширений стенок кровеносных сосудов) данная техника используется в том случае, когда хирургу приходится вместе с аномалией перекрывать жизненно необходимые части артерии. При таком подходе анастомоз компенсирует кровоток из перекрытого сосуда, однако, открытым остаётся вопрос о необходимости формирования анастомоза в том или ином случае.

В данной работе рассматривается два принципиально различных клинических случая формирования обходного анастомоза. Если в первом случае анастомоз был сформирован без дальнейших осложнений, то по итогу другой операции вблизи формирования анастомоза в образовавшейся застойной зоне сформировался тромб. Данное осложнение потребовало проведения срочной повторной операции.

В ходе исследования с помощью программы ITK-Snap была восстановлена геометрия сосудов до и после операции в каждом рассмотренном клиническом случае [1]. Так же была построена конфигурация альтернативного лечения, когда после перекрытия внутренней сонной артерии анастомоз не был сформирован.

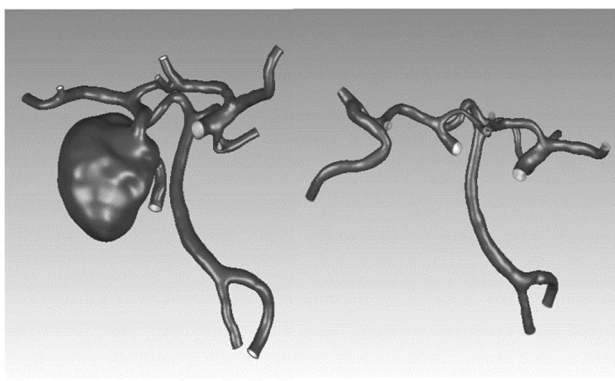


Рис. 1. Конфигурация сосудов с аневризмой до операции (слева) и после операции со сформированным анастомозом (справа) в клиническом случае без осложнений.

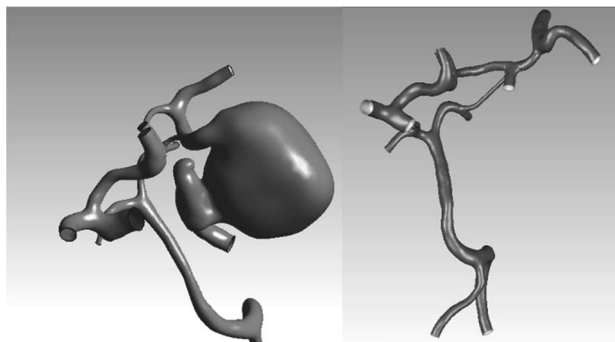


Рис. 2. Конфигурация сосудов с аневризмой до операции (слева) и после операции со сформированным анастомозом (справа) в клиническом случае с дальнейшим формированием тромба.

Численные FSI расчёты и расчёты в конфигурациях с жёсткими стенками были реализованы в пакете ANSYS-CFX в каждой из восстановленных моделей, включая модели альтернативного лечения без сформированного анастомоза. В качестве входных данных в задаче используются литературные данные о массовом расходе в церебральных сосудах [2]. В результате исследования удалось воспроизвести реальную постоперационную картину течения крови и изменение геометрии сосудов после операции. Так же было осуществлено сравнение гемодинамических параметров кровотока для двух рассматриваемых клинических случаев. Кроме того, мы проанализировали подход, описанный в работе [3], и выяснили, что он не всегда применим для предоперационной оценки качества байпаса.

Список литературы:

1. D V Parshin, I O Kuianova, A S Yunoshev, K S Ovsiyannikov On the mechanics of cerebral aneurysms: experimental research and numerical simulation // J. Phys.: Conf. Ser., 2017, V.894, doi:10.1088/1742-6596/894/1/012071
2. Laleh Zarrinkoob, Khalid Ambarki, Anders Wöhlén et al Blood flow distribution in cerebral arteries // Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism, 2015, V. 35. P. 648–654, doi:10.1038/jcbfm.2014.241.
3. Hidetoshi Matsukawa, Shiro Miyata, Toshiyuki Tsuboi et al Rationale for graft selection in patients with complex internal carotid artery aneurysms treated with extracranial to intracranial high-flow bypass and therapeutic internal carotid artery occlusion // 2018, V. 128, Pp 1753–1761, doi: 10.3171/2016.11.JNS161986.

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки РФ (проект №14.W03.31.0002)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛА СТЕНКИ ЦЕРЕБРАЛЬНОЙ АНЕВРИЗМЫ: ЭКСПЕРИМЕНТ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Липовка А.И.^{1,2}, Дубовой А.В.³, Овсянников К.С.³, Паршин Д.В.^{1,2}

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

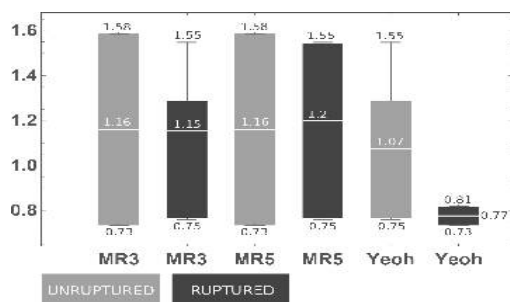
² Новосибирский исследовательский национальный государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

³ Федеральный Центр Нейрохирургии,
630048, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, ул. Немировича-Данченко, 132/1

На протяжении последнего десятилетия патологии сердечно-сосудистой системы остаются самой распространенной причиной смертности среди взрослого населения. Одной из таких патологий является аневризма головного мозга или церебральная аневризма – выпячивание, возникающее на стенке сосуда. Разрыв аневризмы влечёт за собой крайне тяжелые последствия – летальный исход в 30% случаев или тяжелые неврологические нарушения в остальных. Согласно статистике, в среднем церебральная аневризма есть у 1 из 50 человек, однако при этом риск её разрыва достаточно мал (1 из 200 разрывается), и сопоставим с риском развития постоперационных осложнений. Следовательно, для хирурга критически важно понимать вероятность того, что аневризма склонна к разрыву в каждом конкретном случае, чтобы было выбрана наиболее подходящая тактика лечения.

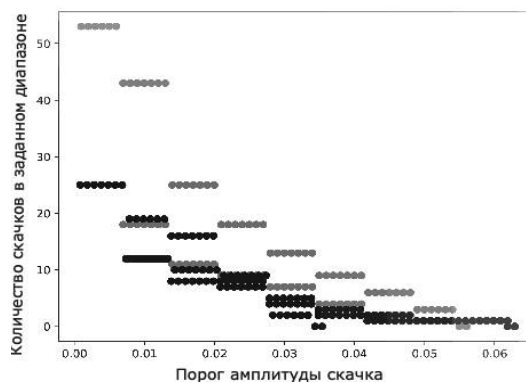
В настоящий момент, несмотря на множество исследований посвященных механизму роста и разрыва аневризмы, этот процесс остаётся до конца не ясен. Одним из подходов, с помощью которых можно получить представление о характере изменений, протекающих в тканях, является численное и математическое моделирование стенок сосудов и аневризмы. В перспективе такое моделирование может обеспечить хирургов инструментом для формирования тактики лечения.

Здоровый сосуд состоит из нескольких слоев, имеющих чёткую границу. В церебральной аневризме происходят необратимые изменения и строение её стенки сильно отличается от здорового сосуда – часть слоёв разрушается, часть отмирает и заменяется соединительной тканью. Строение и свойства такой ткани сильно отличаются от случая к случаю, и её моделирование является сложной задачей. Известно, что при растяжении тканей церебральной аневризмы основная нагрузка приходится на эластин и коллагеновые волокна.



Диапазон применимости моделей в зависимости от статуса аневризмы.

Для построения моделей и исследования строения ткани нами были проведены получены 8 образцов церебральных аневризм и одной здоровой артерии, после чего проведены эксперименты по одноосному нагружению этих образцов на разрывной машине Zwick&Roell Z10. После получения экспериментальных данных было решено исследовать феномен возникающих скачков в stress-strain диаграммах, и изучена гипотеза, согласно которой возникающие скачки являются следствием последовательного разрыва слоёв эластина в ткани аневризмы. Был проведён анализ распределения амплитуд скачков в зависимости от статуса аневризмы, что подтвердило физическую природу возникающих скачков.



Распределение амплитуд скачков.

Кроме того, для каждого этапа эксперимента были построены 3 и 5 параметрические модели Муни-Ривлина и модель Йо. Проведён статистический анализ полученных коэффициентов моделей а так же значений предельного напряжения и деформации для двух когорт аневризм: разорвавшихся и неразорвавшихся. После чего нами были обозначены преимущества каждой из рассмотренных моделей для моделирования ткани аневризмы определенного статуса в различных случаях специфических возможных деформаций тканей – малых, средних, больших.

Работа выполнена при поддержке
Правительства РФ (проект № 14.W03.31.0002)

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СИНОПТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПОСРЕДСТВОМ УСВОЕНИЯ В МОДЕЛИ ТРЕХМЕРНЫХ ПОЛЕЙ ПСЕВДОИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОЛЕННОСТИ

Лишаев П.Н., Кубряков А.А.

Морской гидрофизический институт РАН,
299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2

В работе представлены результаты анализа гидрофизических полей Черного моря, восстановленных при выполнении ретроспективного анализа за 1993–2012 гг. Основное внимание было уделено оценке воспроизведения мезомасштабных вихрей. Для выполнения реанализа гидрофизических полей в модели усваивались трехмерные поля псевдоизмерений температуры и солёности, полученные по оригинальной методике [1] совместного анализа данных об аномалиях уровня моря [2] и редких контактных измерений (на гидрологических станциях и буями-профилимерами Argo [3]). Восстановленные в реанализе вихревые структуры в полях уровня Черного моря сопоставлялись с данными альтиметрии. Для сравнительного анализа воспроизведения мезомасштабных вихрей использовалась процедура автоматической идентификации вихрей [4], основанная на определении замкнутых линий тока в полях скоростей. Рассчитаны координаты вихревых структур, траектории их движения, скорости, время жизни и вертикальная структура.

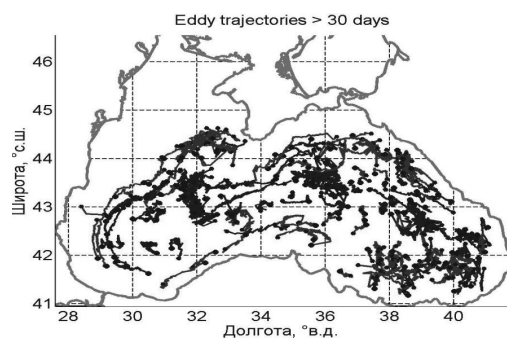


Рис. 1. Траектории движения вихрей с временем жизни более 30 дней.

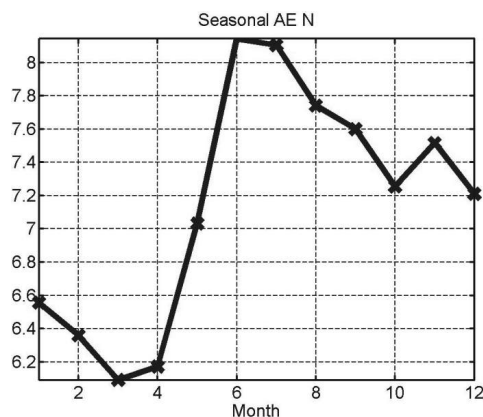


Рис. 2. Сезонная изменчивость количества антициклонов на глубине 100м.

Сопоставление полей уровня моря, восстановленных в прогностическом расчете и в реанализе, с данными альтиметрии показал следующее. В расчете

с усвоением данных наблюдений положение и амплитуда вихрей хорошо совпадает со спутниковыми данными.

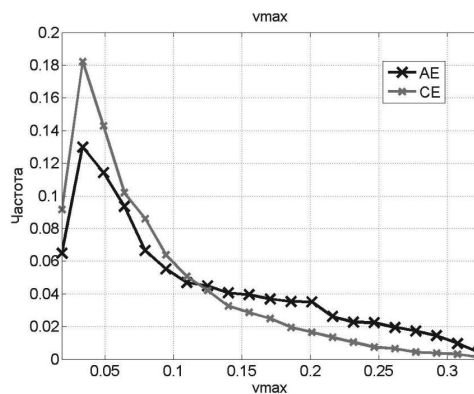


Рис. 3. Диаграмма распределения максимальной орбитальной скорости вихрей.

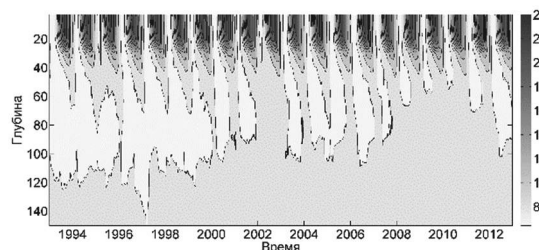


Рис. 4. Диаграмма средней по горизонтам температуры, восстановленной по реанализу.

Показано, что ассимиляция в модели трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солёности позволила скорректировать среднюю стратификацию вод бассейна, воспроизвести качественно и количественно процессы обновления и образования холодного промежуточного слоя.

Список литературы:

1. G.K. Korotaev, P.N. Lishaev, V.V. Knysh Reconstruction of the Three-Dimensional Salinity and Temperature Fields of the Black Sea on the Basis of Satellite Altimetry Measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, No. 9, pp. 961–973.
2. AVISO. <http://www.aviso.altimetry.fr/duacs>.
3. The Argo Program: Observing the Global Ocean with Profiling Floats / Roemmich Dean [et al.] // *Oceanography*. 2009. Vol. 22, No. 2. P. 34–43. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2009.36>.
4. Kubryakov, A.A. & Stanichny, S.V. Mesoscale eddies in the Black Sea from satellite altimetry data // *Oceanology*, 2015, Vol. 55, pp. 56–67.

Работа поддержана РФФ (грант № 17-77-30001);
идентификация вихрей выполнена при поддержке
гранта РФФИ №19-05-00479.

ДИНАМИКА АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОГО БАССЕЙНА НА ОСНОВЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ЦИРКУЛЯЦИИ

Мизюк А.И., Пузина О.С.

Морской гидрофизический институт РАН,
299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2

Высокая рыбопродуктивность Азовского моря обеспечивается большим отношением объема речного стока к объему моря, что также определяет низкую соленость вод и высокую концентрацию в них биогенных веществ. В последнее время, однако, наблюдаются заметные изменения гидрологического режима бассейна. Сокращение стока р. Дон до исторического минимума и аномальная адвекция черноморских вод привели к тому, что в течение 2014–2016 гг. в Таганрогском заливе наблюдалась аномально высокая соленость (до 12‰). Поэтому одна из важнейших прикладных задач – оценка аномального изменения гидротермодинамики бассейна в условиях устойчивого антропогенного воздействия и изменения речного стока.

В Морском гидрофизическом институте РАН (МГИ РАН) недавно была подготовлена региональная конфигурация для модельного комплекса NEMO [1] с ультравысоким пространственным разрешением 1,1 км (0,01°), которая позволяет детально воспроизводить прибрежные субмезомасштабные процессы. Она является развитием исследований, выполненных в [2]. Конфигурация позволяет уточнить значения водообмена между бассейнами Черного и Азовского морей по сравнению с её предыдущей версией, имеющей разрешение 4,5 км.

В настоящей работе представлены методика проведения прогностических расчетов совместной циркуляции вод Черного и Азовского морей с высоким и ультравысоким пространственным разрешением (4,5 и 1,1 км) и общие характеристики гидрофизических полей по результатам численного моделирования. В качестве атмосферного воздействия использовались поля реанализа ERA5 [3]. Отметим, что региональные конфигурации для численных экспериментов практически идентичны и отличаются только горизонтальным пространственным разрешением с соответствующим для него тюнингом параметров бокового турбулентного обмена. Представленные результаты численного моделирования получены с использованием параллельной реализации модели на мощностях нового вычислительного кластера МГИ РАН.

Проводится сопоставление пространственно-временной изменчивости гидрофизических полей для отдельных акваторий расчетного домена для двух вариантов разрешений. Результаты численных экспериментов демонстрируют вполне адекватную картину общей циркуляции Черного моря. В полях можно

выделить элементы мезомасштабной циркуляции: меандрирование Основного Черноморского течения (ОЧТ) на северо-западном шельфе, вихри у Анатолийского побережья. Наряду с мезомасштабными значительное число субмезомасштабных динамических структур ярко выражены в эксперименте с ультравысоким разрешением. Значительно различаются поля скоростей течений, особенно в прибрежных акваториях. Наиболее яркие отличия в пространственной изменчивости при переходе к разрешению субмезомасштабных процессов демонстрируются на примере струи Основного Черноморского течения (ОЧТ) над свалом глубин в северо-западной части моря. В результатах моделирования с ультравысоким пространственным разрешением отмечается большее количество мезомасштабных структур, при этом их положение в целом не совпадает с результатами моделирования с пространственным разрешением 4,5 км. Возможным объяснением этого является изменение баланса членов в уравнении турбулентной кинетической энергии.

Выполнен анализ изменчивости объемного расхода вод через Керченский пролив. При улучшенном пространственном разрешении наблюдается большее поступление черноморских вод. При этом в Азовском море более ярко выражена соленая аномалия. Анализ солености в бассейне по результатам двух экспериментов демонстрирует положительный тренд. Однако, кроме учета водообмена с Черным морем и уменьшения стока рек необходим также учет поступления высокосолёных вод из залива Сиваш.

Список литературы:

1. Madec G. NEMO ocean engine // Note du pôle de modélisation, IPSL, France No.°27 ISSN N. 2012. – P. 1288–1619.
2. Mizyuk A., Senderov M., Korotaev G., Sarkisyan A. Features of the horizontal variability of the sea surface temperature in the Western Black Sea from high resolution modeling // Izvestiya Atmospheric And Oceanic Physics, 2016–52, 5, DOI: 10.1134/S0001433816050108.
3. Copernicus Climate Change Service (C3S) ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate, Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS) // электронный источник <https://cds.climate.copernicus.eu/> (дата последнего обращения 22.08.2018 г.).

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
(грант № 18-05-80025 «Опасные явления»)*

АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКА В УСЛОВИЯХ СМЕШАННОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Носков А.С.¹, Фальков А.А.¹, Шипов Д.Л.¹, Лукьянов В.Е.¹, Морозкин О.Н.²

¹ АО «ОКБМ Африкантова»,

603074, Россия, Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15

² АО «ТВЭЛ»

115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, 49

При обосновании работоспособности и теплотехнической надежности смешанных активных зон, состоящих из тепловыделяющих сборок различного типа, необходимо учитывать перераспределение расходов и поперечные скорости теплоносителя в гидравлически неидентичных сборках.

Для анализа течения теплоносителя в условиях смешанной активной зоны используются ячейковые и CFD коды.

Ячейковый код VIPRE-01 широко используется для анализа теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR.

Трехмерный гидродинамический CFD код STAR-CCM+ предназначен для численного моделирования пространственных течений и тепломассообмена.

В АО «ОКБМ Африкантов» выполнен большой объем работ по верификации кода STAR-CCM+ для задач описания гидродинамики активной зоны:

- рассчитаны и сопоставлены с известными эмпирическими соотношениями зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса для труб круглого сечения;

- сопоставлены расчётные и экспериментальные данные по гидросопротивлению различных элементов тепловыделяющей сборки ТВС-КВАДРАТ;

- выполнено сравнение распределения скоростей по длине фрагментов тепловыделяющих сборок с данными, полученными с помощью эмпирических соотношений по гидросопротивлению и с результатами расчётов по аттестованному теплогидравлическому коду;

- проведено сопоставление расчётных и экспериментальных данных по распределению скоростей в фрагментах смешанных активных зон различного масштаба.

Результаты верификации подтвердили возможность CFD кода STAR-CCM+ корректно рассчитывать гидросопротивление, распределение расходов по ячейкам и обтекание гидравлически неидентичных элементов тепловыделяющих сборок [1].

В АО «ОКБМ Африкантов» для смешанной активной зоны PWR, состоящей из ТВС-КВАДРАТ и референсных тепловыделяющих сборок, выполнен анализ пространственного течения теплоносителя с использованием ячейкового кода VIPRE-01 и трехмерного гидродинамического кода STAR-CCM+. Подход к численному моделированию, разработанный в процессе верификации CFD кода, использовался

при создании фрагментов смешанной активной зоны с ТВС-КВАДРАТ.

Для анализа гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне были разработаны расчётные модели для CFD кода: фрагмент смешанной активной зоны, включающий в себя два нижних пролета с реальной конструкцией решеток и полномасштабный по высоте фрагмент смешанной активной зоны с имитаторами дистанционирующих решеток.

При построении сеточных моделей для CFD кода использовалась полиэдрическая сетка. Расчёты проводились с использованием раздельной модели гидродинамики и RANS моделей турбулентности.

Разработаны расчётные модели для ячейкового кода: фрагмент и полномасштабная смешанная активная зона различной детализации.

Проведён анализ распределения поперечных скоростей и расходов для условий смешанной активной зоны и сопоставление результатов расчётов по двум кодам.

По результатам анализа даны рекомендации по выбору детализации расчётных моделей и количеству шагов по высоте для ячейкового теплогидравлического кода VIPRE-01.

Проведенный анализ показал возможности расчёта продольно-поперечного течения теплоносителя в смешанных активных зонах с использованием ячейкового теплогидравлического и CFD кодов. Получены близкие результаты по перетечкам теплоносителя и максимальным поперечным скоростям.

В рассматриваемой смешанной активной зоне с ТВС-КВАДРАТ, окруженной референсными тепловыделяющими сборками, максимальная величина возмущения реализуется при обтекании одиночной решетки ТВС-КВАДРАТ и составляет ~3% расхода и 0,5 м/с поперечной скорости.

Модель смешанной активной зоны кода VIPRE-01 позволяет корректно учитывать перераспределение потока и использовать данный код для анализа теплотехнических запасов в смешанных активных зонах.

Список литературы:

1. A.S. Noskov, A.A. Falkov, D.L. Shipov. STAR-CCM+ Verification and Application for a Core Fluid Dynamics Analysis//CFD4NRS-7 OECD-NEA & IAEA Workshop, Shanghai, China, 4–6 September 2018.

Работы выполнялись в рамках договора между АО «ОКБМ Африкантова» и АО «ТВЭЛ»

О КОМПАКТНЫХ РАЗНОСТНЫХ СХЕМАХ ПОВЫШЕННОГО ПОРЯДКА СЛАБОЙ АППРОКСИМАЦИИ

Остапенко В.В.^{1,2}, Полунина Е.И.², Хандеева Н.А.^{1,2}

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Поскольку в классической работе [1] было показано, что среди линейных двухслойных по времени разностных схем нет монотонных схем повышенного порядка аппроксимации, то развитие теории численных методов сквозного счета для гиперболических систем законов сохранения в значительной степени было направлено на преодоление этого «запрета Годунова». В результате были разработаны различные классы разностных схем, в которых повышенный порядок аппроксимации на гладких решениях и монотонность достигались за счет нелинейной коррекции потоков. Перечислим основные классы таких схем, которые будем сокращенно называть NFC (Nonlinear Flux Correction) схемами: MUSCL-схемы [2], TVD-схемы [3], WENO-схемы [4], CABARET-схемы [5]. Основное достоинство этих схем заключается в том, что они с высокой точностью локализуют ударные волны при отсутствии существенных нефизических осцилляций.

В дальнейшем для NFC-схем было показано [6], что эти схемы (независимо от их точности на гладких решениях) имеют не более чем первый порядок интегральной сходимости на интервалах, одна из границ которых находится в области влияния ударной волны, что приводит к существенному снижению их точности в этой области. Основная причина такого снижения точности заключается в том [7], что, имея повышенный порядок классической аппроксимации на гладких решениях, они обеспечивают не более, чем первый порядок слабой аппроксимации на разрывных решениях. Одновременно в [7] было показано, что в симметричных компактных разностных схемах порядка классической аппроксимации на гладких решениях и слабой аппроксимации на разрывных решениях совпадают.

Поскольку симметричные компактные схемы неустойчивы на сильных разрывах, был предложен специальный метод стабилизации простейшей из них, являющейся трехслойной по времени и трехточечной по пространству. Этот метод связан с добавлением в правую часть схемы специальной искусственной вязкости, аппроксимирующей на нижнем временном слое четвертую пространственную производную, что обеспечивает сохранение повышенного порядка слабой аппроксимации. Модифицированная таким образом компактная схема показала существенные более высокую точность в областях влияния ударных волн по сравнению с TVD-схемой [3].

Основной недостаток компактной схемы, предложенной в [7], заключается в том, что она (несмотря на неявную реализацию, связанную с применением прогонки и итераций по нелинейности) является за-

ведомо устойчивой в линейном приближении только при числах Куранта $\tau < 0.5$, а максимально быстрое затухание схемных осцилляций на фронте ударной волны происходит в ней при $\tau < 0.25$. В результате, расчеты по этой схеме проводились при $\tau = 0.25$, что существенно ниже характерных чисел Куранта, которые используются в явных NFC-схемах. Поэтому цель данной работы заключается в разработке нового варианта компактной схемы повышенного порядка слабой аппроксимации, устойчивость которой не связана с указанными выше ограничениями на число Куранта.

В настоящей работе изучается устойчивость и точность трехпараметрического семейства трехслойной по времени компактных разностных схем с искусственными вязкостями четвертого порядка дивергентности, которые добавляются во все временные слои схемы. Показано, что эти схемы имеют третий порядок как классической аппроксимации на гладких решениях, так и слабой аппроксимации на разрывных решениях. В результате спектрального анализа устойчивости этих схем в линейном приближении, получены оптимальные значения их коэффициентов вязкости, при которых схема является устойчивой при числах Куранта $\tau < 1.5$. Приведены тестовые расчеты, демонстрирующие существенные преимущества новой компактной схемы по сравнению с TVD- и WENO-схемами при расчете разрывных решений с ударными волнами.

Список литературы:

1. Годунов С.К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики // Матем. Сборник. 1959. Т. 47, № 3. С. 271–306.
2. Van Leer B. Toward the ultimate conservative difference scheme. V. A second-order sequel to Godunov's method // J. Comput. Phys. 1979. V. 32. № 1. P. 101–136.
3. Harten A. High resolution schemes for hyperbolic conservation laws // J. Comput. Phys. 1983. V. 49. P. 357–393.
4. Jiang G.S., Shu C.W. Efficient implementation of Weighted ENO schemes // J. Comput. Phys. 1996. V. 126. P. 202–228.
5. Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов // Головин В.М., Зайцев М.А., Карабасов С.А., Короткин И.А. М.: Изд-во МГУ, 2013. 467 с.
6. Ковыркина О.А., Остапенко В.В. О сходимости разностных схем сквозного счета // Доклады АН. 2010. Т. 433. № 5. С. 599–603.
7. Остапенко В.В. О построении разностных схем повышенной точности для сквозного расчета нестационарных ударных волн // Ж. вычисл. матем. и матем. физики. 2000. Т. 40. № 12. С. 1857–1874.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда (грант № 16-11-10033)*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДА К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ЗАДАЧАХ ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ ПРИ ДОЗВУКОВЫХ И ТРАНСЗВУКОВЫХ СКОРОСТЯХ ВНЕШНЕГО ПОТОКА

Поплавская Т.В.¹, Бойко А.В.^{1,2}, Демьянко К.В.^{1,3}, Кириловский С.В.¹, Нечепуренко Ю.М.^{1,3}

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

² Тюменский государственный университет, 625003, Россия, Тюмень, ул. Володарского, 6

³ Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука, 119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 8

Определение положений ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) в пограничном слое (ПС) необходимо для решения задачи ламинаризации обтекания крыльев, мотогондол и других элементов летательных аппаратов с целью снижения их сопротивления. В данной работе численно исследовано обтекание потоком воздуха плоской пластины и сверхкритического аэродинамического профиля NASA-SR-0410 на дозвуковых и трансзвуковых режимах течения, в частности, в диапазонах чисел Маха и углов атаки, соответствующих крейсерскому полету гражданских самолетов. Такой крыловой профиль выбран потому, что для него имеются измерения положения ЛТП при числах Маха от 0.25 до 0.85, проведенные в трансзвуковой АДТ [1].

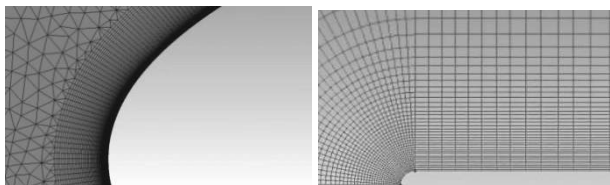


Рис. 1. Фрагмент расчётной области вблизи передней кромки профиля NASA-SR-0410 (а) и пластины (б).

Для расчета ламинарного течения используется газодинамический пакет общего назначения ANSYS Fluent. Для моделирования ЛТП в рамках осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) используются два различных метода: 1) блок ЛТП LOTRAN 2.0, рассчитывающий положения ЛТП на основе физически обоснованного метода переменного N -фактора (e^N -метод) и 2) популярная в академических и промышленных кругах инженерная эмпирическая модель перехода Transition SST, встроенная в пакет ANSYS Fluent. В численном моделировании тело располагалось в центре расчетной области (Рис. 1). Для разрешения ПС на поверхности тела задавался призматический подслей, а все остальное пространство расчетной области в случае крылового профиля заполнялось треугольными ячейками нерегулярным образом.

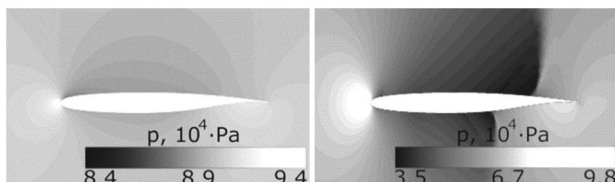


Рис. 2. Поля давления при дозвуковом ($M_\infty=0.25$) и трансзвуковом ($M_\infty=0.85$) режимах обтекания крыла.

В работе проведены расчеты сжимаемого ламинарного течения для безградиентного ПС на пластине и для градиентного течения на крыловом профиле при различных числах Маха (см Рис. 2). Полученные

данные о двумерном ламинарном течении конвертировались во внутреннее представление блока ЛТП с помощью модуля экспорта данных. В процессе работы блок ЛТП определяет характеристики ПС, отрисовывает кривые N -факторов и соответствующие их пороговым значениям положения ЛТП (Рис. 3).

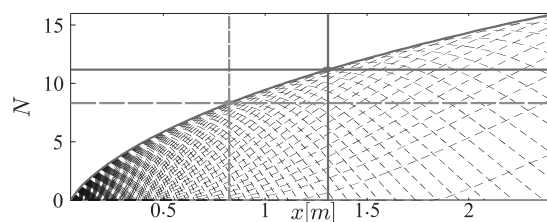


Рис. 3. Положения перехода (прямые линии): пластина $M_\infty=0.146$, $Re_l=3.3 \times 10^6$ 1/м, $T_\infty=288$ К, $Tu=0.03\%$.

В работе выполнено численное моделирование двумерного ламинарно-турбулентного обтекания пластины и крылового профиля при дозвуковых и трансзвуковых скоростях внешнего потока с использованием оригинального программного комплекса LOTRAN 2.0, а также с использованием модели Transition SST. Проведено сравнение расчетных данных по положению ЛТП, полученных разными методами между собой и с экспериментальными данными (Рис. 4). Проведены расчеты в диапазоне чисел Маха $0.146 \div 0.85$ и получены новые данные по положению ЛТП для трансзвуковых режимов обтекания. Показано, что LOTRAN 2.0 дает прогноз положений ЛТП с большей точностью в широком диапазоне чисел Маха, включая трансзвуковые режимы течения.

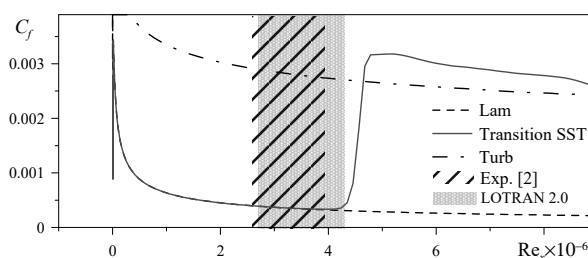


Рис. 4. Коэффициенты поверхностного трения: пластина $M_\infty=0.146$, $Re_l=3.3 \times 10^6$ 1/м, $Tu=0.03\%$.

Список литературы:

1. A. A. Haghir, N. Fallahpour, M. Mani, M. Tadjfar Experimental study of boundary layer in compressible flow using hot film sensors through statistical and qualitative methods // J. Mech. Sci. Technol. 2015. Vol. 29. № 11. P. 4671–4679.
2. Schubauer G.B., Klebanoff P. S. Contributions to the mechanics of boundary-layer transition // NACA TN 3489. 1955.

Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда (проект № 18-19-00460)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CFD КОДА STAR-CCM+ ДЛЯ РАСЧЕТОВ РЕЖИМОВ КИПЕНИЯ В ТРУБАХ И ПУЧКАХ СТЕРЖНЕЙ

Савиновский А.С.

АО «ОКБМ Африкантов»,
603074, Россия, Нижний Новгород, ул. Бурнаковский проезд, 15

Вопросы расчёта потока теплоносителя в режиме недогретого и объёмного кипения являются одним из основных при теплогидравлическом обосновании активных зон как кипящих реакторов, так и реакторов под высоким давлением. Возможность расчёта кипящего потока теплоносителя позволяет с использованием CFD кодов определять:

- температуру обогреваемой стенки (оболочек твэлов), работающих в режиме пристенного и объёмного кипения;
- паросодержание в потоке;
- условия наступления кризиса теплообмена, который является основным критерием при обосновании теплогидравлических характеристик активных зон ЯР.

Сложность моделирования процесса кипения обусловлена большим количеством используемых моделей и необходимостью их настройки под условия задачи. В работе представлены результаты моделирования кипения потока теплоносителя в вертикальной равномерно обогреваемой трубе, ячейках ТВС различного типа, а также 9-ти стержневых пучках стержней с использованием CFD кода STAR-CCM+, приведён комплекс используемых при расчете моделей.

Корректность расчетов проверялась:

- по объёмному паросодержанию: сравнением с результатами эксперимента «труба Бартоломея» и ячейкового бенчмарка PSBT (ячейки ТВС с квадратной упаковкой стержней). Эксперименты проводились при близких к активным зонам параметрам (массовым скоростям, недогревам теплоносителя, тепловым потокам) и давлениях в диапазоне 4, 5...17 МПа;
- по температуре обогреваемой поверхности: сравнением с расчетами по инженерным корреляциям;
- по критической мощности для труб: сравнением с данными скелетных таблиц для давления 15,

7 МПа, диапазона массовых скоростей 1500...5000 кг/(м²·с);

- по критической мощности для 9-ти стержневого пучка: сравнением с данными эксперимента на теплофизическом стенде для давления 15 МПа.

Сопоставление результатов расчёта с результатами эксперимента по объёмному паросодержанию показало, что основной массив точек лежит в пределах максимальной относительной погрешности ≈40%.

В результате расчетов с пошаговым увеличением теплового потока с обогреваемых поверхностей сгенированы зависимости температуры стенки от теплового потока, а также проведено сравнение их с результатами расчёта по инженерным методикам. Сравнение показало, что температура стенки определяется с приемлемой точностью, во всём спектре тепловых потоков (от 0 до значения при котором наступал кризис теплообмена).

Моделирование кипения теплоносителя в трубах позволяет с достаточной точностью определять условия наступления кризиса теплообмена: среднеквадратичные погрешности составили для области отрицательных относительных энтальпий ≈22%; для зоны положительных относительных энтальпий ≈7%, при заявленной среднеквадратичной погрешности эксперимента 10%. Моделирование кризиса теплообмена в 9-ти стержневом пучке также позволяет получать значения близкие к экспериментальным.

Исходя из проведенных расчетов можно сделать вывод, что в рамках заложенных в STAR-CCM+ замыкающих соотношений, при условии постоянного сечения геометрической модели (без учета сложных трехмерных эффектов) возможно приемлемое определение величин объёмного паросодержания, температуры стенки и критической тепловой мощности.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ХАЛИННОЙ СТРАТИФИКАЦИИ
В ЧЕРНОМ МОРЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ****Сендеров М.В., Мизюк А.И., Коротаев Г.К.**Морской гидрофизический институт РАН,
299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2

Описание процесса формирования халинной стратификации в Черном море является актуальной и до сих пор до конца не решенной проблемой. Вертикальная структура черноморских вод имеет ряд отличительных особенностей, среди которых отметим существование резкого халоклина в слое 100–300 м, где вклад солености в плотность морской воды преобладает по сравнению с температурой. Такая стратификация обусловлена значительным речным стоком, преобладанием испарения над осадками и поступлением мраморноморских вод через пролив Босфор.

Для исследования закономерностей формирования халинной стратификации в Черном море в работах [1,2] предложена численная и лабораторная модели кругового вращающегося бассейна. Описанные в [2] лабораторные эксперименты моделируют основные крупномасштабные особенности циркуляции и стратификации, обусловленные речным стоком и поступлением высокосолёных мраморноморских вод. Эти исследования показали, что в простой конфигурации потоки плавучести через границы бассейна приводят к образованию резкого пикноклина и формированию трехслойной по вертикали структуры горизонтальных течений.

Развитие этих исследований в работе [3] предложена численная модель, которая позволяет изучать формирование вертикальной халинной структуры за счет потоков плавучести на границах бассейна в реальной геометрии Черного моря на различных этапах его эволюции от пресноводного озера до текущего состояния. На основе разработанной модели были выполнены численные эксперименты с различной начальной соленостью, однородной по вертикали. Эти расчеты демонстрируют, что приблизительно за сто лет в каждом расчете устанавливается халинная стратификация с выраженным халоклином, которая в дальнейшем медленно эволюционирует.

На основе этих результатов для кругового вращающегося бассейна была построена аналитическая модель, описывающая процесс формирования халинной стратификации и оценено характерное время перехода в режим медленной эволюции [4]. В случае глубины и объема бассейна соответствующему Черному морю это характерное время оказалось соответствующим оценкам работы [3]. Кроме того, из предложенной модели вытекает определенное соотношение между перепадом солености на поверхности бассейна и на дне с потоком соли через халоклин.

В настоящей работе представлено 5 численных экспериментов, которые подтверждают описанные выше результаты работы [4]. Прогностические расчеты получены с помощью модельного комплекса NEMO [5]. Использовалась конфигурация с грубым пространственным разрешением (20 км) для бассейнов Черного, Азовского и Мраморного морей. Вертикальное турбулентное перемешивание описывалось гармоническим оператором с постоянными коэффициентами. Значения турбулентной вязкости и диффузии совпадали и равнялись $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Как и в работе [3], в этих расчетах была выбрана однородная по вертикали и горизонтали начальная соленость со значениями 8, 12, 16, 18 и 22 ‰. Учитывался речной сток и отрицательный поток массы на поверхности моря (преобладающее испарение). Водообмен через Босфор рассчитывался непосредственно в модели. Каждый расчеты проводился на 65 модельных лет. Численные эксперименты показали, что в море формируется халоклин на глубине 10–40 м. Такая глубина обусловлена тем, что проникновение солёных вод через пролив Босфор происходит на глубине около 40 м, а речной сток значительно распресняет верхний слой. Также показано, что, в полном соответствии с результатами работы [4], существует связь потока соли через халоклин с перепадом солености между поверхностными и глубинными слоями бассейна, представленная степенной зависимостью с показателем, предсказанным теорией

Список литературы:

1. Булгаков С. Н., Коротаев Г. К., Уайтхед Дж. А. Роль потоков плавучести в формировании крупномасштабной циркуляции и стратификации вод моря. Часть 1: Теория // Известия РАН ФАО, 1996. Том. 32, № 4, С. 548–556.
2. Булгаков С. Н., Коротаев Г. К., Уайтхед Дж. А. Роль потоков плавучести в формировании крупномасштабной циркуляции и стратификации вод моря. Часть 2: Лабораторные эксперименты // Известия РАН ФАО, 1996. Том. 32, № 4 С. 557–564.
3. Сендеров М. В., Мизюк А. И. Влияние начальных условий на водообмен через Босфор и формирование вертикальной халинной структуры черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. Севастополь, 2017. Вып. 2. С. 82–89.
4. Коротаев Г. К. Формирование вертикальной стратификации полей солености и плотности Черного моря. Тезисы доклада. Настоящий сборник.
5. Madec G. NEMO ocean engine // Note du pôle de modélisation, IPSL, France N°27 ISSN N. 2012. – P.1288–1619.

Работа поддержана РНФ (грант № 17-77-30001)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ РЭЛЕЯ-БЕНАРА В КРУГОВОМ ЦИЛИНДРЕ ПРИ ВВЕДЕНИИ МАЛЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ПОСТАНОВКИ

Смирнов С.И., Абрамов А.Г., Смирнов Е.М.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Важнейшее свойство турбулентной конвекции, развивающейся в подогреваемом снизу круговом цилиндре конечной высоты, заключается в наличии глобальной циркуляции, называемой также конвективной ячейкой. Особенно ярко это свойство проявляется в случае емкости, высота которой равна диаметру (см. рис. 1а).

При строго вертикальной ориентации оси цилиндра и осесимметричных граничных условиях нет преимущественного азимутального положения конвективной ячейки, и, соответственно, ничто не препятствует ей случайным образом перемещаться по углу (см. рис. 1б) или совершать прецессию. При экспериментальных исследованиях конвекции Рэлея-Бенара данного вида, конкретное «азимутальное» поведение ячейки определяется пусть и весьма малыми, но неизбежными отклонениями от осевой симметрии, присутствующими в лабораторной модели. При проведении численного моделирования отклонения от осесимметричности могут присутствовать в вычислительной сетке и/или в вычислительном алгоритме.

Случайное перемещение конвективной ячейки по углу сильно затрудняет процесс получения статистических характеристик существенно трехмерных полей скорости и температуры, а также полей величин, характеризующих фоновую турбулентность. «Привязать» конвективную ячейку к определенному положению можно, искусственно вводя некоторый стабилизирующий фактор, например, слабый наклон емкости [1, 2], или предписывая малые контролируемые отклонения от осесимметричности нагрева.

В настоящей работе методом прямого численного моделирования исследовалось влияние малых отклонений от осесимметричности постановки на турбулентную конвекцию Рэлея-Бенара в цилиндрической емкости с единичным отношением высоты к диаметру. В качестве отклонений выступали предписанные синусоидальные возмущения в распределении температуры на нижней стенке или наклон оси емкости на небольшой угол ($1-2^{\circ}$). Исследовалось также влияние топологии вычислительной сетки в горизонтальных плоскостях при сохранении числа ячеек и пристенного разрешения. Расчеты были проведены для двух сред: воды ($Pr=6.4$) и ртути ($Pr=0.025$), при числе Рэлея, составляющем 10^6 .

Расчеты на основе полных уравнений Навье-Стокса, записанных в приближении Буссинеска, проводились с использованием конечно-объемного «неструктурированного» программного кода SINF/Flag-S, разрабатываемого сотрудниками кафедры «Гидроаэродинамика, горение и теплообмен» СПбПУ. Применялся метод дробных шагов со вторым порядком точности [3].

На всех границах цилиндрической емкости ставились условия прилипания. На горизонтальных стенках задавались постоянные температуры (исключения составляли варианты расчетов, в которых предписывалась слабая неоднородность распределения

температуры на нижней стенке). Боковая цилиндрическая поверхность полагалась адиабатической.

По результатам расчетов (см. рис. 1, 2) установлено, что посредством введения малых отклонений от осесимметричной постановки, не приводящих к сколь-нибудь существенным изменениям в актуальной структуре конвекции, удастся зафиксировать конвективную ячейку в определенном положении и получить численные реализации, достаточные для определения статистических характеристик моделируемой турбулентной конвекции.

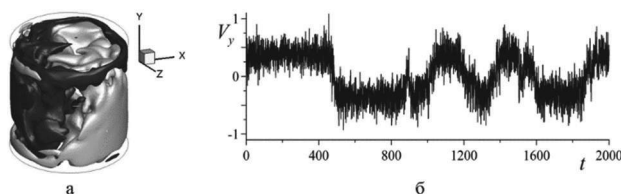


Рис. 1. (а) Изоповерхности вертикальной компоненты скорости V_y (темные структуры соответствуют нисходящему течению, светлые – восходящему); (б) временные изменения V_y вблизи боковой стенки в центральном горизонтальном сечении: осесимметричная постановка; $Pr=0.025$.

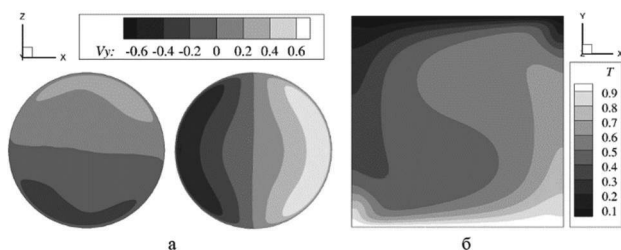


Рис. 2. (а) Осредненные (по длительным выборкам) поля вертикальной компоненты скорости в центральном горизонтальном сечении емкости, полученные в исходной осесимметричной постановке (слева) и при наклоне емкости на 2° (справа); (б) поле температуры в вертикальном сечении, полученное при наклоне емкости: $Pr=0.025$.

Список литературы:

1. Cioni S., Ciliberto S., Sommeria J. Experimental study of high-Rayleigh-number convection in mercury and water // Dyn. Atmos. Oceans. 1996. Vol. 24. No. 1. P. 117–127.
2. Ahlers G., Brown E., Nikolaenko A. The search for slow transients, and the effect of imperfect vertical alignment, in turbulent Rayleigh-Bénard convection // J. Fluid Mech. 2006. Vol. 557. P. 347–367.
3. Смирнов С.И., Смирнов Е.М., Смирновский А.А. Влияние теплопереноса в торцевых стенках на турбулентную конвекцию ртути во вращающемся цилиндре // НТВ СПбПУ. Физ.-мат. науки. 2017. Т. 10. №1. С. 31–46.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №17-08-01543). Расчетные данные получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра СПбПУ.

Тарасов Н.И.¹, Поляков С.В.^{1,2}, Кудряшова Т.А.¹¹ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
125047, Россия, Москва, Миусская пл., 4² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
115409, Россия, Москва, Каширское ш., 31

В работе рассмотрено применение метода двойного потенциала для моделирования потока несжимаемой жидкости [1], [2], [3]. Данная математическая модель позволяет избежать неустойчивости численного счета при расчете давления, возникающей при использовании уравнений Навье-Стокса в естественных переменных [4]. Кроме того, метод двойного потенциала позволяет упростить постановку граничных условий для векторного потенциала, которая, при решении уравнений Навье-Стокса в переменных векторный потенциал-вихрь в трехмерном случае, представляет сложную задачу.

Для получения численного решения в данной работе использовался метод конечного объема по центрам элементов расчетной сетки [5]. При дискретизации уравнений для расчета вихря применялось экспоненциальное преобразование [6].

Для проверки полученной численной методики и программного кода было использовано две задачи. Первая состояла в установлении потока Пуазейля в длинной трубе круглого сечения. Вторая заключалась в поиске стационарного потока в широкой трубе прямоугольного сечения с сепаратором около выходного отверстия, геометрия которой изображена на рис.1. Результаты моделирования выхода на стационарный поток для данных задач были получены для различных значений числа Рейнольдса. Для проверки полученных данных аналогичные расчеты были проведены с помощью программного пакета Ansys CFD. Полученные в ходе численного моделирования с помощью метода двойного потенциала и в программном пакете Ansys CFD результаты согласуются (см. рис. 2).

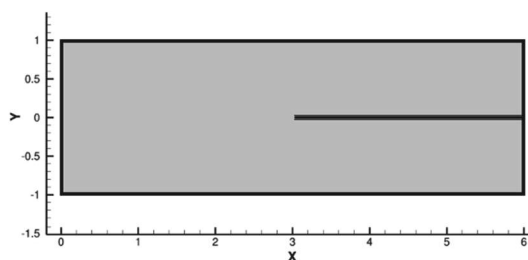


Рис. 1. Продольное сечение трехмерной расчетной области для $z=0$.

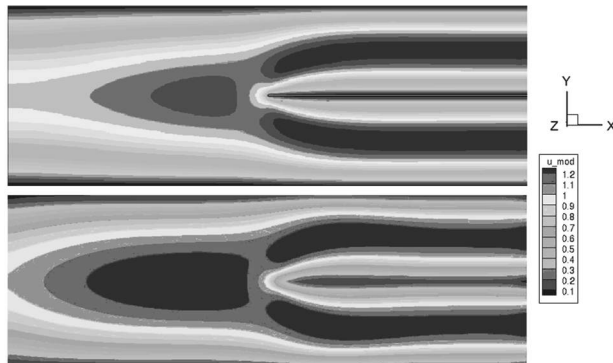


Рис. 2. Распределения модуля скорости в продольном сечении $z=0$ для $Re=50$, рассчитанные в ANSYS CFD методом SIMPLEC (сверху) и методом двойного потенциала (снизу).

Список литературы:

1. Richardson S.M., Cornish A.R. Solution of three-dimensional incompressible flow problems // J. Fluid Mech. Vol. 82, part 2 (1977), P. 309–319.
2. Richardson S.M. Numerical solution of the three-dimensional Navier – Stokes equations. Doctoral dissertation. Department of Chemical Engineering and Chemical Technology, Imperial College of Science and Technology, London, 1976.
3. Gegg S. G. A dual-potential formulation of the Navier-Stokes equations. (1989) Retrospective Theses and Dissertations. 9040. URL: <https://lib.dr.iastate.edu/rtd/9040>.
4. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 618 с.
5. Eymard R., Gallouet T.R., Herbin R., The finite volume method. Handbook of Numerical Analysis, Amsterdam, North Holland, 7, 713–1020, (2000).
6. Поляков С.В. Экспоненциальные разностные схемы для уравнения конвекции-диффузии // Mathematica Montisnigri. Vol. XXVI (2013). С. 29–44.

РФФИ 18-51-18004-болг-а, 18-07-01292-а,
18-07-00841-а.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА ТОПЛИВА ПРИ РАЗРУШЕНИИ ТВЭЛА

Усов Э.В.¹, Бутов А.А.¹, Климонов И.А.¹, Чухно В.И.¹, Лобанов П.Д.^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики, Новосибирский филиал
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Тяжелая авария в ядерной энергетической установке характеризуется разрушением тепловыделяющих элементов и выходом радиоактивности выше установленного предела. Интенсивный выход радиоактивности из ТВЭЛ возможен по двум причинам. Первая причина связана с термическим или термомеханическим разрушением оболочки ТВЭЛ и выходом в теплоноситель заполняющего ТВЭЛ газа вместе с радиоактивными продуктами деления. Вторая ситуация обусловлена плавлением топлива и как следствие выходом продуктов деления из его расплава. По этой причине определение массы топлива в жидком и твердом состояниях важно для анализа радиационных последствий аварий. При движении расплава по поверхности ТВЭЛ возможно его затвердевание на относительно холодных области тепловыделяющей сборки и блокировка проходного сечения, что многократно ухудшает последствия аварии.

Одной из особенностей быстрого реактора является значительное отличие в температурах плавления оболочки и топлива, составляющих 1700 К и 3123 К, соответственно, что приводит к сдвигу по времени процессов выхода продуктов деления и возможности рассматривать плавление, движение расплава и его затвердевание для оболочки и для топлива независимо друг от друга.

Известен ряд работ, посвященных экспериментальному исследованию процессов, сопровождающих термическое разрушение ТВЭЛ [1, 2]. Проведение полноценных качественных экспериментов требует больших человеческих и финансовых затрат. Численное моделирование термического разрушения ТВЭЛ менее комплексная и трудоемкая задача. В то же время сколько-нибудь реалистичный детерминистический расчет требует учета множества факторов и связанного моделирования разнообразных физических процессов.

Распределение температуры в ТВЭЛ зависит от теплофизических свойств материалов, их теплоемкости, плотности и теплопроводности. По этой причине топливный состав ТВЭЛ в большой степени определяет закономерности и последовательность процессов, которые сопровождают его термическое разрушение.

Для того чтобы определить место и время начало плавления ТВЭЛ во время аварии, необходимо определить температурное поле в материалах ТВЭЛ. Температурное поле в ТВЭЛ находится путем решения уравнения теплопроводности. Для учета фазовых переходов уравнение может быть решено как аналитически [3], так и численно с использованием энтальпийной формулировки [4, 5].

Для численного решения движения расплава решается система уравнений сохранения массы, энергии и импульса записывается в конечно-разностном виде. Базовая численная схема для конвективных членов строится с использованием противопоточной аппроксимации. Для особых случаев могут быть использованы схемы более высокого порядка точности. Описание особенностей численной реализации схем будет также приведено в работе.

Стоит отметить, что в процессе решения используется два типа расчетных сеток. Первая сетка необходима для решения тепловой задачи, вторая для моделирования движения расплава. В процессе расчета осуществляется обмен информацией между сетками. Из тепловой задачи передаются данные о количестве расплава и его температуре, о внешнем радиусе неразрушенной части ТВЭЛ и толщине расплава. В обратную сторону также передается информация о количестве замерзшего расплава, о его новой температуре, а также о величине теплового потока, который приходит из расплава в ТВЭЛ.

С помощью разработанных алгоритмов проведено исследование движения расплава топлива по поверхности тепловыделяющего элемента с различным типом топлива. Наиболее важным является определение количества расплава, вынесенного за пределы ТВЭЛ, поскольку количество вынесенного расплава напрямую определяет мощность реактора из-за наличия обратных связей между полем нейтронов и количеством материалов в активной зоне.

Список литературы:

1. Усынин Г.Б., Аношкин Ю.И., Семенчиков М.А. Исследование плавления ТВЭЛ на имитаторах с топливными композициями. // Атомная энергия. 1991. т.70. вып. 2. С. 108–110.
2. Усынин Г.Б., Аношкин Ю.И., Власичев Г.Н., Галицкий Ю.Н., Семенчиков М.А. Модельное изучение процессов, возникающих при перегреве ТВЭЛ. // Атомная энергия. 1986. т.61. вып. 5. С. 347–350.
3. E.V. Usov, A.A. Butov, S.I. Lezhnin, P.D. Lobanov. Solving the Stefan problem in the relation to melting of fuel elements of fast nuclear reactors // Journal of Engineering Thermophysics. 2018. v. 27. № 4. P. 545–553
4. Усов Э.В., Бутов А.А., Чухно В.И., Климонов И.А., Кудашов И.Г., Жданов В.С., Прибатурин Н.А., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф. Моделирование плавления ТВЭЛ быстрого реактора и затвердевания образующегося расплава с помощью модуля SAFR/V1 интегрального кода ЕВКЛИД/V2 // Атомная энергия. 2018. Т.124. Вып. 3. С. 123–126.
5. Alexiades V., Solomon A. D. Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes, Hemisphere Publ. Co. 1993. P. 323.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда (грант № 18-79-10013)*

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ПОГРУЖЕННЫХ ГРАНИЦ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГИДРОДИНАМИКИ С ПОДВИЖНЫМИ ТЕЛАМИ

Филимонов С.А.^{1,2}, Гаврилов А.А.^{1,2}, Дектерев А.А.^{1,2}

¹ Сибирский Федеральный Университет,
660041, Красноярский край, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

При численном решении задач гидродинамики для дискретизации уравнений используются расчетные сетки. В случае сложной геометрии построение сетки становится отдельной трудоемкой и вычислительно затратной задачей. Особенно проблема построения сетки проявляется при моделировании подвижных тел: то есть когда возникает необходимость перестраивать сетку на каждом временном шаге. Существует несколько путей решения этой задачи, одним из которых является метод погруженных границ (immersed boundary method IBM).

Основная идея IBM заключается в следующем: твердое тело «погружается» в существующую расчетную сетку, и делит её на несколько подобластей – область жидкости, область тела и граница тела. В ячейки, которые пересекаются границей тела, вносится объемная сила, стремящаяся привести скорость жидкости в ячейке к скорости границы тела.

IBM в отличие от метода с сеткой, согласованной с геометрией, затрачивает меньше времени на подготовку задачи к расчету и для тел сложной формы требует меньшее количество ячеек сетки. К недостаткам IBM можно отнести значительное число дополнительных операций, необходимых для определения расчетных геометрических параметров, однако, такой подход позволяет эффективно моделировать обтекание движущегося тела. В данной работе представлена реализация IBM в программном комплексе SigmaFlow [1], на основе метода призрачных ячеек (ghost-cell method) [2]. Приведено описание определения необходимых для геометрических параметров. Описан метод реализации расчета объемной силы в ячейке пересекаемой границей. Приведены результаты верификации метода для двух и трехмерных задач при ламинарных и турбулентных режимах течения, как для Ньютоновских так и для вязкопластичных сред.

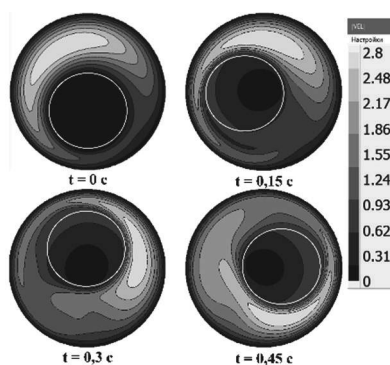


Рис. 1. Мгновенное распределения модуля вектора скорости в кольцевом зазоре в разные моменты времени.

В работе представлено практическое применение метода погруженных границ на примере течения

в кольцевом канале с подвижным внутренним цилиндром. Число Рейнольдса аксиального потока задавалось равным $Re = 350$. Внутренний цилиндр вращается вокруг собственной оси с вращательным числом Рейнольдса $Re_\tau = 90$, и совершает орбитальное вращение вокруг центра внешнего цилиндра с орбитальным Рейнольдса $Re_o = 90$. Результат расчета представлен на рис. 1 и рис. 2.

На рис. 2 представлено сравнение коэффициента сопротивления F для варианта без орбитального движения внутреннего цилиндра и с орбитальным движением.

$$F = (dp/dz) \cdot D / (\rho \cdot U^2 / 2),$$

где dp/dz – перепад давления на единицу длины, D – гидравлический диаметр, ρ – плотность жидкости, U – средняя аксиальная скорость. Как видно из результатов расчета орбитальное вращение для данного режим увеличивает коэффициент трения в среднем на 15%.

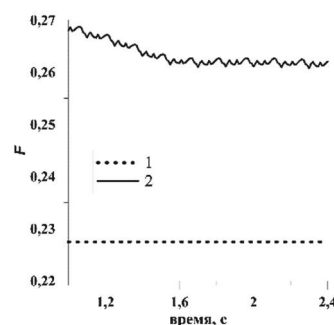


Рис. 2. Коэффициент сопротивления для двух вариантов расчёта: 1 – без орбитального движения, 2 – с орбитальным движением.

Разработанная модель позволяет эффективно моделировать влияние подвижных твердых тел на течение жидкости.

Список литературы:

1. Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Минаков А.В. Современные возможности CFD кода SigmaFlow для решения теплофизических задач // Сборник статей. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2010. Т. 4. № 2. С. 117–122.
2. Tseng Y.-H., Ferziger J.H. A ghost-cell immersed boundary method for flow in complex geometry // J. Comput. Phys. 2003. Vol. 192, № 2. P. 593–623.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН.
Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительство Красноярского края в рамках научного проекта № 18-41-242001

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ КОЛМОГОРОВА В ВЯЗКОЙ И НЕВЯЗКОЙ СРЕДАХ

Фортова С.В.¹, Опарина Е.И.¹, Шепелев В.В.¹, Долуденко А.Н.²

¹ ИАП РАН, 123056, г. Москва, ул. 2-я Брестская, д. 19/18

² ОИВТ РАН, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

e-mail: sfortova@mail.ru

Несмотря на то, что турбулентность – существенно трехмерное явление, интерес в двумерной турбулентности привлекает к себе внимание многих исследователей [1–6]. Крейчнаном и Бэтчелором [3, 4] был установлен тот факт, что двумерная турбулентность не является упрощенной моделью трехмерной турбулентности и обладает своими уникальными характеристиками и свойствами. В двумерном случае нелинейность приводит к возникновению движений с масштабами, значительно превосходящими масштаб накачки, с возникновением крупных когерентных структур. Энергия распределяется по обратному каскаду с законом $-5/3$ Крейчнана [3], энстрофия же переносится с масштаба накачки в малые масштабы (прямой каскад) с законом -3 . Такие движения встречаются при образовании циклонов и антициклонов, когда высота атмосферы составляет 10 км, а размер циклона – 100 км, и течение можно отнести к квазидвумерному.

В данной работе мы рассматриваем задачу, предложенную А.Н. Колмогоровым для изучения причин возникновения турбулентности, в вязкой и невязкой средах в двумерном случае под действием по одной из координат периодического поля внешней силы [1, 2]. Мы предлагаем численное исследование данной задачи на основе решения систем уравнений Эйлера и Навье-Стокса. Расчёты показывают, что при определённых условиях в жидкости могут возникать периодические структуры вихрей, похожие на режим «паркета» в течении Колмогорова, с последующим развитием обратного каскада (рис. 1). Исследовалось влияние различных параметров на характер течения, дан сравнительный анализ формирующихся течений для вязкой и невязкой сред.

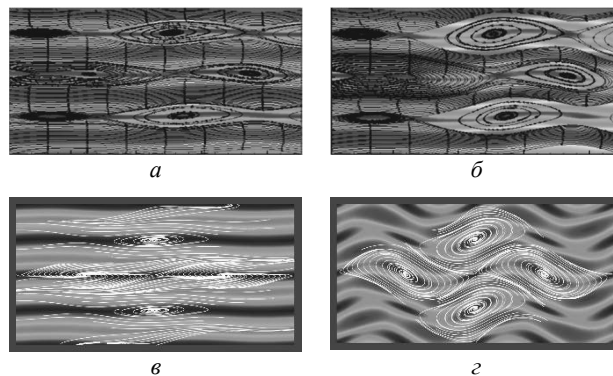


Рис. 1. Формирование «вихревого паркета» и его распад при численном моделировании задачи Колмогорова. Линии тока и модуль скорости для невязкого (а), (б) и вязкого (в), (г) случаев.

Список литературы:

1. Е.Б. Гледзер, Ф.В. Должанский, А. М. Обухов. Системы гидродинамического типа и их применение // М.: Наука. 1981.
2. А.М. Обухов. Течение Колмогорова и его лабораторное моделирование // УМН. 38(4). 1983. С. 101–111.
3. R. H. Kraichnan. Phys. Fluids. 10. 1417. 1967.
4. G. K. Batchelor. Phys. Fluids. 12. 233. 1969.
5. H. Xia, M. Shats, and G. Falkovich. Phys. Fluids. 21. 125101. 2009.
6. J. Laurie, G. Boffetta, G. Falkovich, I. Kolokolov, and V. Lebedev. Phys. Rev. Lett. 113. 254593. 2014.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда
(Соглашение № 17-11-01293)

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТРАТИФИКАЦИИ И УКЛОНОВ ДНА СКЛОННО-ШЕЛЬФОВЫХ УЧАСТКОВ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРЫМА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

Шульга Т.Я., Свищева И.А., Пластун Т.В.

Морской гидрофизический институт РАН,
299001, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2

В работе обсуждается распространение внутренних волн на шельфе Черного моря, оказывающих воздействие на процессы перемешивания в его внутренних слоях и на вертикальный обмен. Исследованы параметры горизонтальных неоднородностей, связанных с изменениями рельефа дна и поля плотности морской воды, приводящие к неустойчивости и разрушению внутренних волн. Результаты работы оценивают возможность восстановления глубины залегания сезонного пикноклина на основе данных дистанционного зондирования в рамках двухслойной аппроксимации вертикальной структуры плотности.

Область исследования включает два обширных участка материкового шельфа к юго-востоку и к северу от Гераклейского полуострова (первый – между Севастополем и Ялтой, второй – Каламитский залив). При этом используется батиметрия Черного моря, представленная файлом глубин <http://www.gebco.net>. Вдоль материковой отмели между Евпаторией и Ялтой равномерно расположены 18 нормальных к берегу разрезов, для которых проведены численные эксперименты.

Для анализа поверхностных проявлений внутренних волн использованы данные дистанционного зондирования за 2017–2018 гг. Обнаружение и описание пакетов внутренних волн реализовано на основании доступных спутниковых снимков (Landsat-8, Sentinel-2), полученных из открытых источников <http://glovis.usgs.gov/>, <https://earthexplorer.usgs.gov/>, <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.

В результате решения линеаризованных уравнений движения в приближении Буссинеска получены теоретические оценки параметров внутренних волн. Численное решение краевой задачи для вращающегося бассейна переменной глубины на широте 44° с.ш., заполненного стратифицированной жидкостью [1], позволило найти первые нормальные моды вертикальной скорости на указанных разрезах. В качестве начальных данных используются профили весеннего и летнего распределений частоты Брента-Вайсяля. Сезонная вертикальная плотностная стратификация морской воды рассчитывается по Международному уравнению состояния UNESCO с использованием временных рядов по температуре и солёности из банка океанографических данных МГИ [2]. Банк данных включает обобщенные данные судовых измерений (1951–2008 гг.) и глубоководных буев-профилемеров (2005–2008 гг.) на стандартных горизонтах 0–1500 м.

Данная работа является продолжением работы [3], в которой на основании обобщения и анализа данных наблюдений и результатов моделирования реконструированы детали бароклинной динамики и исследованы пространственно-временные характеристики внутренних волн на шельфе Крымского побережья.

Систематизированные результаты исследования представлены в виде веб-атласа, находящегося в открытом доступе в сети интернет <https://qgiscloud.com/April/WebAtlasWaves2>.

Результатом обработки данных дистанционного зондирования явилась информация о скоростях и длинах, наблюдаемых на снимках поверхностных проявлений внутренних волн. Расчеты скорости этих волн проведены с использованием SNAP Desktop для серий последовательных спутниковых снимков за 2017–2018 гг. Скорости вычислены по значениям дистанций пространственного смещения волн и с учетом информации о времени съемки спутниковыми сенсорами в районе исследований. Данные о скорости и длинах волн, используются в дисперсионном соотношении для длинных и коротких внутренних волн [4] в предположении о двуслойной стратификации моря для оценки глубины залегания максимума частоты Вайсяля – Брента.

Исследованы топографические особенности в районе Гераклейского полуострова, влияющие на распространение внутренних волн. Из наблюдений и модельных расчетов известно [5], что в зависимости от топографического уклона энергия внутренней волны может отражаться вверх по склону (докритические условия), отражаться от берега (сверхкритические условия) или оказываться захваченной у дна (критические условия). Для разных уклонов дна на свале глубин в районе Крымского побережья и известным профилям частоты плавучести определены частоты, на которых возможен переход от сверхкритического к критическому или докритическому условиям.

Список литературы:

1. Yankovsky A E., Zhang T. Scattering of a Semidiurnal Barotropic Kelvin Wave into Internal Waves over Wide Continental Shelves dynamics // Phys. Oceanogr. 2017. Vol. 47. P. 2745–2762.
2. Белокопытов В.Н., Шокурова И.Г. Оценки десятилетней изменчивости температуры и солёности в Черном море в период 1951–1995 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2005. № 12. С. 12–21.
3. Internal Waves over the Continental Shelf of the Heracles Peninsula: Modeling and Observation / V.A. Ivanov, T.Ya. Shul'ga, A.V. Bagaev et al.; Springer Nature Switzerland AG 2019 V. Karev et al. (Eds.), 2019. pp. 83–92.
4. Волны внутри океана / К.В. Коняев, К.Д. Сабинин // СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 272 с.
5. Stephenson G.R. Jr., Hopkins J.E., Mattias Green J.A. et al. Baroclinic energy flux at the continental shelf edge modified by wind-mixing // Geophys. Res. Lett. 2015. 42. P. 1826–1833.

Работа выполнена в рамках научного проекта РФФИ и г. Севастополя №18-45-920036 и частично в рамках государственного задания № 0827-2018-0004



СЕКЦИЯ 6

Методы и средства теплофизического и гидрогазодинамического эксперимента



ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРОВ КАПЕЛЬ В ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Баталов В.Г., Степанов Р.А., Сухановский А.Н.

Институт механики сплошных сред УрО РАН,
614013, Россия, Пермь, ул. Академика Королева, 1

Измерение распределений капель в воздушно-капельных потоках по размерам, скоростям, пространственной плотности является важной прикладной задачей. Используемые на данный момент методы измерений, в частности оптические, дают определенные результаты. В простых случаях, когда плотность потока частиц невелика и их образы не пересекаются, удается получить достаточно близкое к истинному распределение капель жидкости различными оптическими методами, в частности, методами Interferometric Particle Imaging (далее IPI) и Glare Point Technique (далее GPT) [1, 2]. С возрастанием плотности частиц результаты, полученные методами IPI и GPT, начинают расходиться [3]. В связи с этим нами прилагаются усилия по определению причин возникновения этого расхождения и поиску путей устранения ошибок. Поскольку в GPT методе применяется прямое фотографирование образов капель, и процесс расшифровки поддается простому визуальному контролю, его можно применять в качестве опорного (проверочного) метода. С другой стороны, отказываться от метода IPI не хотелось бы, поскольку он значительно менее трудоемкий.

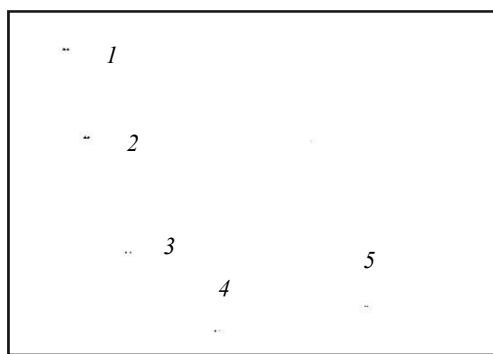
В связи с вышесказанным, метод IPI был дополнен процедурой, использующей вейвлет-преобразования на стадии обработки IPI-образов частиц.

В результате было обнаружено, что IPI-образы могут иметь сильно неоднородную структуру. Это приводит к существенной вариации периода интерференционного изображения и, как следствие, к возрастанию ошибки определения размера капли. Предложенный алгоритм оценки ошибки, позволяет ввести дополнительный критерий отбора.

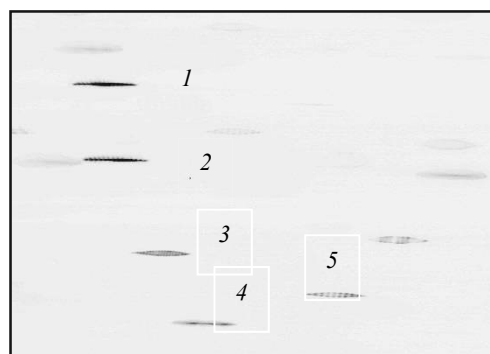
Список литературы:

1. Sukhanovskii A., Batalov V. and Stepanov R. Comparison of Direct optical and IPI methods in real flow measurements // Proceedings 26th European Conference on Liquid Atomization & Spray Systems Bremen, Germany, 8–10 September 2014, Editors: Lydia Achelis and Udo Fritsching. P. 1–9. ISBN: 978–3–00–047070–7.
2. Sukhanovskii A., Batalov V. and Stepanov R. Using of direct imaging and IPI techniques for measurements in nozzle sprays // AIP Conference Proceedings, 1770, 030023 (2016), <http://dx.doi.org/DOI: 10.1063/1.4963965>.
3. A. Sukhanovskii, V. Batalov, R. Stepanov, Drawbacks of GPT and IPI measurements in dense sprays // Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, V 103, p. 29–36.

*Работа выполнена при поддержке
гранта РФФИ № 19-08-00574*



(a)



(б)

Рис. 1. Одновременно снятые образы капель жидкости на матрице CCD камеры:
(a) для метода GPT и (б) для IPI (для лучшего восприятия изображения инвертированы).

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВИЗОРА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ОБРАЗЕЦ**Бунтин Д.А.¹, Шиплюк М.А.²**¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, Институтская 4/1² Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, Новосибирск, Пирогова, 1

Измерения тепловых потоков в разных областях науки является важной и актуальной задачей. Существуют различные способы измерений тепловых потоков: по темпу роста температуры (например, калориметрические датчики), градиентные датчики теплового потока (ALTP, Германия), по ИК излучению тела и пр. Одним из методов измерения температуры является тепловизионная методика. К преимуществам этой методики относятся ее панорамность и отсутствие необходимости монтировать датчики в образце. Данный метод применяется во многих областях науки и, в частности, аэродинамике.

При измерении тепловых потоков аэродинамических моделей при помощи тепловизора необходимо восстановить тепловой поток из измерений температуры поверхности модели, решая обратную задачу распространения тепла в полубесконечном теле. При этом температуру поверхности необходимо измерять с достаточно высокой точностью.

Применяя тепловизионную методику в аэродинамическом эксперименте и известные алгоритмы восстановления теплового потока, авторы столкнулись с проблемой того, что измеренные тепловые потоки расходятся с предсказаниями теории и данными прямого численного моделирования в 2–3 раза. Как выяснилось, с подобными проблемами при измерении тепловых потоков тепловизором столкнулись и другие исследователи (например, в ЦАГИ).

Анализ полученных данных показал, что проблема состоит именно в измерении температуры поверхности.

Экспериментальные данные были получены в аэродинамических установках импульсного или кратковременного действия, где время пуска и, следовательно, время воздействия теплового потока, составляло от нескольких сотен до нескольких десятков миллисекунд. При таком режиме воздействия теплового потока возникает большой градиент температуры вглубь поверхности модели. Кроме того, известно, что ИК излучение имеет определенную глубину поглощения в веществе. Т.е. тепловизор воспринимает

излучение не только с поверхности образца, но и с некоторой глубины, показывая не температуру поверхности, а некоторую среднюю температуру на глубине прозрачности. В равновесной ситуации или в присутствии небольших градиентов температуры подобная ошибка отсутствует или незначительна. Однако в присутствии больших градиентов температура поверхности может измеряться с большой ошибкой, что приводит к ошибке в определении тепловых потоков.

В работе рассматривается гипотеза, что именно этот эффект приводит к некорректному восстановлению тепловых потоков в аэродинамическом эксперименте, а также рассматриваются методы улучшения точности измерения температуры поверхности. Анализируются данные, полученные в аэродинамической трубе кратковременного действия «Транзит-М», время пуска которой составляет около 200 мс. Эксперименты проводились при числе Маха $M=6$ в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

Для регистрации температуры поверхности использовался тепловизор Flir (США) с частотой записи кадров от 100 до 350 Гц и разрешением матрицы 320×256 . Восстановление тепловых потоков по измеренным полям температуры проводилось с использованием алгоритма Кука-Фельдермана [1].

Кроме этого, влияние длительности нагрева изучалось на специальном стенде.

Список литературы:

1. Cook W and Felderman E Reduction of data from thin-film heat transer gages: a concise numerical technique. AIAA J. 1966. V. 4 P. 561–562.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект АААА-А17-117030610126-4)

ОБРАБОТКА ДАННЫХ МРТ И ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИНТОВОГО ХАРАКТЕРА ТЕЧЕНИЯ В МОДЕЛЯХ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ

Ванина В.С.^{1,2}, Хе А.К.^{1,2}

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 15

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

В медицине существует такой неинвазивный метод исследования кровотока, как магнитно-резонансная томография (МРТ). Принцип работы МРТ основан на ядерном магнитном резонансе (ЯМР) и заключается в измерении электромагнитного отклика атомов водорода. Для измерения поля скорости МРТ-сканером используется протокол 4D Qflow, результатом которого являются три серии (набора) данных. Каждая серия состоит из DICOM-изображений и отвечает за проекцию на одну из трех взаимно перпендикулярных плоскостей. DICOM-изображения это монохромные изображения, у которых значения пикселей пропорциональны интенсивности ЯМР-сигнала.

Движение крови в классической гемодинамике описывается ламинарным и турбулентным течением. Принято считать, что в организме преобладает ламинарный характер течения крови и при некоторых условиях – турбулентный. Однако, исследования [1, 2] структуры кровотока показывают существование еще и вращательно-поступательного характера течения крови на отдельных участках сердечно-сосудистой системы человека, например, в аорте.

Роль вращательно-поступательного характера течения крови в организме человека еще до конца не изучена. Оказывает ли винтовой характер течения положительное воздействие на движение крови по сосудам или же способствует возникновению сердечно-сосудистых заболеваний – вопрос остается открытым.

В данной работе исследуется возможность воссоздания трехмерной нестационарной структуры течения жидкости в моделях кровеносных сосудов на основе магнитно-резонансной томографии, создание метода обработки медицинских данных и количе-

ственного сравнения численного расчета в пакете ANSYS с данными полученными с помощью МРТ.

Набор экспериментальных данных был получен в ходе изучения течения в силиконовых моделях с помощью МР томографа Philips Ingenia 3T с полем 3 Тл (МТЦ СО РАН). Жидкость в модели подавалась с помощью программируемого насоса CompuFlow 1000MR. В качестве имитации крови выступал 40% раствор глицерина с водой. По данным 4D съемки с помощью программы ITC-Snap были получены трехмерные модели сосудов. Проведен численный расчет в ANSYS CFX. В качестве начальных данных в задаче использовались данные о массовом расходе, которые задавались в эксперименте. Для обработки изображений была создана программа в среде MATLAB, позволяющая визуализировать характер течения, повысить качество DICOM-изображений и провести сравнение с данными, полученными при численном расчете.

В результате анализа результатов экспериментов была показана возможность визуализации винтового характера течения по данным томографа, описан метод обработки DICOM-изображений и приведено сравнение численного расчета и данных МРТ.

Список литературы

1. Кирсанов Р.И., Куликов В.П. Винтовое (вращательно-поступательное) движение крови в сердечнососудистой системе // Успехи физиологических наук. 2013. Т. 44, № 2, С. 62–78.
2. Гатаулин Я.А., Зайцев Д.К., Смирнов Е.М., Федорова Е.А., Юхнев А.Д. Расчетно-экспериментальное исследование слабо-закрученного течения жидкости в модели кровеносного сосуда // Научно-технические вести СПбГПУ. Физико-математические науки. 2015. Т. 8, № 4 С. 36–47.

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки РФ (проект № 14.W03.31.0002)

МАЛОВОЗМУЩАЮЩАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ ДИАГНОСТИКА ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

Гордиенко М.Р., Яворский Н.И., Правдина М.Х., Полякова В.И., Езендеева Д.П., Какаулин С.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Работа посвящена экспериментальному исследованию энергоразделения в газодинамическом потоке или вихревому эффекту. Открытый Г. Дж. Ранком [1] в 1928 г., вихревой эффект до сих пор не получил адекватного общепринятого физического объяснения. Казалось бы, механизмы нагревания и охлаждения очевидны. Периферийный поток нагревается трением о боковую поверхность, а осевой охлаждается в силу адиабатического расширения газа, как это происходит в турбодетандере. Но расчет показывает, что нагревание периферийного потока происходит более сильное, чем обеспечивается трением. Далее, если в турбодетандере кинетическая энергия холодного потока расходуется на поддержание вращения турбинки, то в вихревой трубке не ясно, каким образом кинетическая энергия осевого потока передается периферийному слою газа [1–3].

В работе реализован маловозмущающий и малоинерционный метод температурной диагностики в вихревой трубке. Эксперименты выполнены на стенде, специально созданном для изучения внутренней структуры течения газа во всем объеме трубки Ранка квадратного сечения с использованием максимума возможных методов диагностики. Необходимость использования современных бесконтактных теневых, доплеровских и трековых методов диагностики наряду с контактными термобарометрическими обусловила выбранные технические решения

Экспериментальный стенд предназначен для изучения внутренней структуры течения газа во всем объеме трубки Ранка с использованием оптических методов регистрации. Трубка Ранка состоит из завихрителя, рабочего канала, радиального диффузора и диафрагмы. В завихрителе от сети сжатого воздуха через патрубок подается сжатый воздух, давление которого регулируется вентилем. Воздух попадает в кольцевой канал, откуда через тангенциальные щели (их может быть от одной до четырех с сохранением общей площади входного сечения) поступает в вихревую камеру с гиперболической торцевой стенкой. В такой камере значение циркуляции сохраняется вплоть до радиуса выхода потока из камеры в рабочий канал. Это позволяет увеличить окружную скорость на входе в канал по сравнению со скоростью воздуха в щелях. Канал состоит из трех секций длиной 130 мм. Секции имеют по две прозрачные стенки из оптического стекла, что позволяет исследовать поток оптическими методами при просвечивании в поперечном направлении [5–6].

На «горячем» конце канала в качестве дросселя использован радиальный диффузор, в котором кинетическая энергия газа превращается в потенциальную энергию давления. Между дисками диффузора с помощью калиброванных шайб устанавливается зазор

от 0.5 мм до 1.5 мм, регулирующий соотношение расходов в «холодный» и «горячий» выходы. На «холодном» конце трубки расположена диафрагма. Сторона квадрата в сечении составляет 34 мм. В такой трубке эффект Ранка проявляется вполне четко, хотя эффективность несколько снижается по сравнению с круглой трубкой диаметра 34 мм [4–5]

Маловозмущающая температурная диагностика основывалась на внесении в поток в нескольких сечениях прочного специально изготовленного датчика температуры с малым поперечным сечением. Датчики температуры основаны на оstedлованных полупроводниковых бусиновых термисторах прямого подогрева СТЗ-4в номинальным сопротивлением 2,2 кОм. Датчики имеют следующие основные рабочие характеристики: температурный коэффициент сопротивления 3,2...4,2% / °С при номинальной температуре +20°С, номинальный диапазон рабочих температур –60...+125°С, постоянную времени 4 с. Все датчики предварительно калибровались и линеаризовались.

Исследовано распределение температуры в различных сечениях по длине вихревой трубки, также исследован профиль распределения температуры в завихрителе. Измерения показали, что распределение температуры в вихревой трубке являлось нестационарным. В дальнейшем нестационарность температурного поля предполагается исследовать путем параллельных измерений с дискретной пространственной выборкой в характерных точках потока.

Список литературы:

1. Ranque G.J. Experiences sur la detente avec productions simultanees d'un echapment d'air chaud et d'air froid// J. Physique Radium. – 1933. – Vol.7, No 4. – P.112.
2. Гуцол А.Ф. Эффект Ранка // Успехи физических наук. – 1997. – Т. 167, №6. – С. 665–687.
3. Xue Y., Arjomandi M., Kelso R. A critical review of temperature separation in a vortex tube// Experimental Thermal and Fluid Science. – 2010. – Vol. 34, No 8. – С. 1367–1374.
4. Арбузов В.А., Дубнищев Ю.Н., Лебедев А.В., Правдина М.Х., Яворский Н.И. Наблюдение крупномасштабных гидродинамических структур в вихревой трубке и эффект Ранка// Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23, № 23. – С. 84–90.
5. Дубнищев Ю.Н., Меледин В.Г., Павлов В.А., Яворский Н.И. Исследование структуры течения и энергоразделения в вихревой трубке квадратного сечения// Теплофизика и аэромеханика. – 2003. – Том 10, №4. С. 587–598.

Экспериментальное исследование потока в трубе Ранка-Хилша выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (АААА-А18-118051690120-2), разработка методики исследования потока выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 18-31-20036)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПЕРЕХОДА НА ШЕРОХОВАТЫХ ТЕЛАХ ЗАТУПЛЕННОЙ ФОРМЫ ПРИ $M=5, 6, 8$

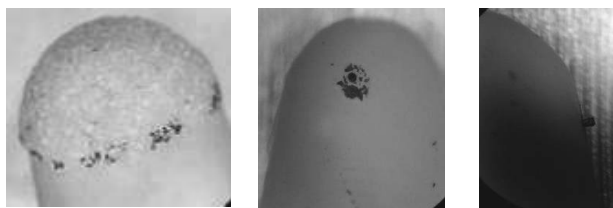
Громыко Ю.В., Бунтин Д.А., Поливанов П.А.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Шероховатость поверхности может оказать существенное влияние на распределение теплового потока на гиперзвуковых летательных аппаратах, что в основном обусловлено смещением области ламинарно-турбулентного перехода. Высокие тепловые нагрузки могут вызвать изменение шероховатости поверхности во время полета вследствие абляции теплозащитного материала, эрозии поверхности. Возникновение шероховатости на носовой части наиболее вероятно, потому что обычно в этой области имеется максимум тепловой нагрузки. Причем возникновение перехода на носовой части может привести к турбулизации всей поверхности летательного аппарата [1, 2].

Данные о процессе турбулизации за одиночной и распределенной шероховатостями, расположенными непосредственно на затупленном носике модели ($R=5$), были получены с помощью тепловизионного метода на конусе с углом полураствора 7° для разных чисел Маха.

Эксперименты по определению ламинарно-турбулентного перехода телевизионным методом выполнялись в гиперзвуковой аэродинамической трубе «Транзит – М» при числах Маха $M=4, 95, 5, 95$ и $7, 95$. Единичное число Рейнольдса варьировалось в диапазоне $Re_1=(4, 1 \div 58, 1) \times 10^6$ 1/м. Рассматривались два типа шероховатости – распределенная и одиночная, которые располагались в области притупления и имели углы нанесения $\Theta=60^\circ$ и 90° (см. рис.1).



а б в

Рис. 1. Носики с шероховатостями $R=5$ мм:
а – распределенная шероховатость $\Theta=90^\circ$;
б, в – одиночная шероховатость высотой $k=480$ мкм
($\Theta=60^\circ$ и 90° соответственно)

Распределенная шероховатость изготавливалась при помощи калиброванного песка, наклеенного на носик. Песок наносился под углом $\Theta=90^\circ$, а затем, по мере надобности, счищался до нужного угла. В качестве

материала для изготовления одиночной шероховатости была выбрана леска, которая позволяла с высокой точностью контролировать диаметр шероховатости.

График эффективных чисел Рейнольдса, при котором происходил ламинарно-турбулентный на носике модели при разных числах Маха, показан на рис. 2. Видно, что для всех исследуемых чисел Маха и видов шероховатости минимальное единичное число Рейнольдса, при котором ламинарно-турбулентный переход происходил на носике модели, соответствует углу $\Theta=90^\circ$. Можно сделать вывод о том, что для притуплений, близких к сферическим, наиболее критическое место расположения шероховатости находится около линии сопряжения сферической части и конуса: $\Theta \approx 90^\circ$. Также важно отметить уменьшение эффективных чисел Рейнольдса с увеличением числа Маха.

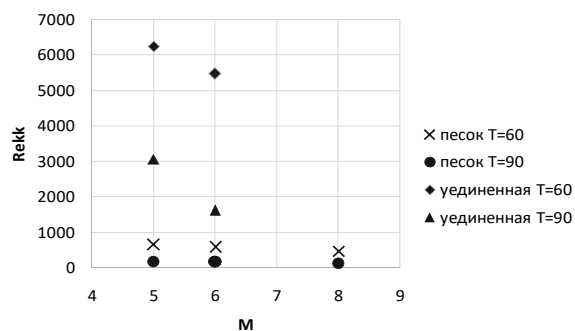


Рис. 2. Зависимость числа Рейнольдса, при котором произошел ламинарно-турбулентный переход, умноженного на среднюю высоту шероховатости ($Re_{kk}=Re \cdot Ra$) от числа Маха набегающего потока.

Список литературы:

1. Schneider S.P.: Effects of Roughness on Hypersonic Boundary-Layer Transition.// J. Spacecraft and Rockets. 2008. V 45, P. 193–209.
2. Bountin D.A., Gromyko Yu.V., Maslov A.A., Polivanov P.A., Sidorenko A.A. Effect of the surface roughness of blunt cone forebody on the position of laminar-turbulent transition.// Thermophysics and Aeromechanics. 2016. V. 23, P. 629–638.

Работа поддержана Программой
фундаментальных исследований государственных
академий наук на 2013–2020 годы
(проект АААА-А17-117030610126-4)

ОЦЕНКА АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА, РЕАЛИЗУЮЩЕГО МЕТОД ФАЗОВОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ

Двойнишников С.В., Чубов А.С., Рахманов В.В., Бакакин Г.В., Семенов Д.О.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Совершенствование методов трехмерной диагностики сложнопрофильных объектов актуально для энергетических технологий из-за повышающихся требований к геометрической точности элементов энергетических систем [1–3].

При измерениях трехмерной геометрии сложнопрофильных объектов методами фазовой триангуляции [4] важно обеспечить выбор оптимальной частоты пространственной модуляции [5]. Эта частота должна быть максимальной для снижения погрешностей метода. Погрешность измерения координаты Z (глубины сцены), согласно [6] можно оценить:

$$\Delta z = \frac{\Delta \varphi \cdot p}{2\pi \cdot \tan \theta} = \frac{\Delta I \cdot p}{2\pi \cdot I \cdot \sqrt{M} \cdot \tan \theta}, \quad (1)$$

где p – период пространственной модуляции излучения, θ – угол триангуляции, M – количество фазовых изображений, $\Delta I/I$ – относительная погрешность фотоприемника.

Из выражения (2) следует, что погрешность определения координаты z пропорциональна периоду пространственной модуляции излучения. Для минимизации погрешности измерения методом фазовой триангуляции необходимо минимизировать период пространственной модуляции оптического излучения, увеличивая частоту. С другой стороны, максимальная пространственная частота на регистрируемом изображении должна быть меньше, чем эквивалентная частота импульсного отклика оптической системы измерителя.

Данная работа посвящена сравнительному обзору методов оценки амплитудно-частотной характеристики оптической системы измерительного комплекса, реализующего метод фазовой триангуляции.

Зависимость изображения на фотоприемнике от распределения, формируемого на поверхности объекта источником излучения интенсивности можно представить в виде свертки функции импульсного отклика системы и функции распределения интенсивности изображения, формируемого на поверхности измеряемого объекта источником излучения [4]:

$$g(x, y) = \iint h(x - x_1, y - y_1) f(x_1, y_1) dx_1 dy_1 + n(x, y), \quad (2)$$

где g – сформированное на фотоприемнике изображение, h – импульсный отклик оптической системы или функция рассеяния точечного источника, f – функция распределения интенсивности изображения, формируемого на поверхности измеряемого объекта источником излучения, а n – шум на изображении.

В частотном пространстве выражение (2) примет вид:

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v). \quad (3)$$

Задача определения оптимальной пространственной частоты модуляции излучения сводится к определению частоты w , при которой

$$H(w) \cdot w \rightarrow \max. \quad (4)$$

Как правило, данную проблему решают путем прямого выбора частоты пространственной модуляции при проектировании измерительной системы. Такой подход будет достаточно эффективен при измерении однообразных объектов с одинаковыми параметрами измерения. Однако в случае необходимости обеспечить высокоточные измерения сложнопрофильных объектов, случайно ориентированных в пространстве, такой подход может стать источником дополнительных ошибок измерения.

В работе представлены методы оценки амплитудно-частотной характеристики оптической системы измерительного комплекса на основе прямого измерения амплитудно-частотной характеристики оптической системы путем управления пространственной модуляцией источника освещения; на основе анализа изображений при пространственной модуляции оптического источника, кодирующего бинарный код Грея; на основе оценки пространственно-частотного анализа наблюдаемого фотоприемником изображения.

Список литературы:

1. Двойнишников С.В., Куликов Д.В., Меледин В.Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного восстановления профиля поверхности трехмерных объектов сложной формы // Метрология №4, 2010. – С. 15–27.
2. Куликов Д.В., Аникин Ю.А., Двойнишников С.В., Меледин В.Г. Лазерная технология определения геометрии ротора под нагрузкой // Электрические станции №7, 2010. – С. 39–43.
3. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Шпольвинд К.В. Метод компенсации нелинейности тракта источник–приемник оптического излучения при 3D-измерениях на основе фазовой триангуляции / Измерительная техника», ISSN 0368–1025. №2 2012, С. 12–16.
4. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Павлов В.А. Высокоскоростная обработка фазовых изображений с использованием параллельных вычислений // Автометрия. – 2017. – Т. 53. – №2. – С. 56–62.
5. Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Главный В.Г., Наумов И.В., Чубов А.С. Оценка оптимальной частоты пространственной модуляции излучения 3D-измерений // Измерительная техника №5, 2015. – С. 24–27.
6. L. Chen, C. Liang, X. Nguyen, Y. Shu, H.-W. Wu, High-speed 3D surface profilometry employing trapezoidal phase-shifting method with multi-band calibration for colour surface reconstruction, Meas. Sci. Technol. 21 (10) (2010) 105309.

*Работа выполнена в рамках
государственного задания ИТ СО РАН*

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРИСТЕННЫХ ТЕЧЕНИЙ

Жаркова Г.М., Коврижина В.Н.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Институтская 4/1

Визуализация пристенных течений занимает особое положение в аэродинамическом эксперименте. Разработка новых материалов для этих целей является актуальной задачей. Среди широко применяемых методов визуализации можно выделить метод жидкокристаллических (ЖК) покрытий. Связано это с возможностью получения картины пристенного течения за один эксперимент. Тонкий слой ЖК покрытия на исследуемой поверхности не вносит возмущений в пограничный слой. Изменение структуры пристенного течения сопровождается изменением температуры и трения вблизи обдуваемой поверхности. Поэтому знание их панорамного распределения позволяют визуализировать области перехода ламинарного течения в турбулентное, отрыва и присоединения потока, а также влияние ударных волн на пограничный слой.

Создание панорамных пленочных сенсоров температуры и касательных напряжений связано с решением проблемы разделения оптического отклика ЖК на температуру и механический сдвиг.

При разработке сенсоров различного назначения использовались жидкие кристаллы на основе эфиров холестерина и ряда кислот. Для тепловых задач разработаны термочувствительные полимерно-жидкокристаллические пленки, не реагирующие на механических сдвиг со следующими характеристиками: толщина пленки 20–30 мкм; рабочий температурный диапазон от –5 до +150С; пороговая чувствительность 5×10^{-4} Вт/см²; постоянная времени 0,2–0,3с; теплопроводность $0,17 \pm 0,20$ Вт/м·град и температуропроводность $3 \div 4 \times 10^{-7}$ м²/с. Разработанные пленки нашли применение при исследовании теплообмена при различных скоростях течений (Рис.1) [1].

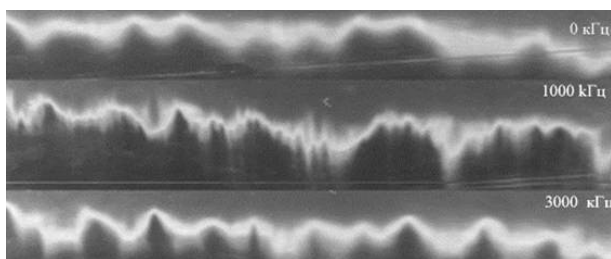


Рис. 1. Визуализации влияния синусоидальных акустических возмущений с частотами < 3 КГц на поле температур модели крыла.

Выполнен комплекс исследований по созданию ЖК смесей, чувствительных к трению. Измерены зависимости цвета от температуры $\lambda=f(T)$ и трения

$\lambda=f(\tau)$. Получено, что с уменьшением температурной чувствительности смесей, уменьшается чувствительность к трению. Смесь с рабочим температурным интервалом 50С характеризуется чувствительностью к температуре $\Delta\lambda/\Delta T = 0,5$ нм/С, и чувствительность к трению – $\Delta\lambda/\Delta\tau = (1,94 \pm 2)$ нм/Па/

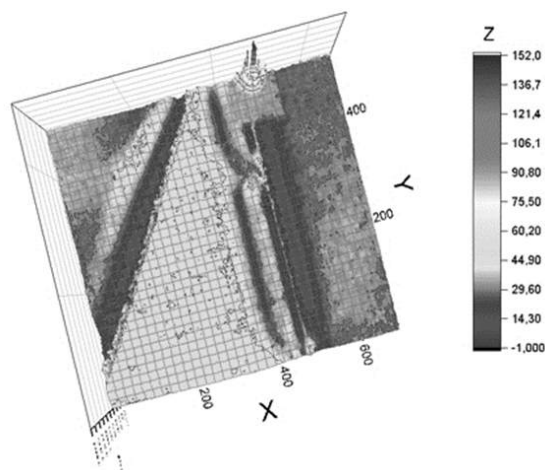


Рис. 2. Визуализация цветового тона оптического отклика ЖК покрытия на механический сдвиг, индуцированный набегающим потоком.

Тестирование разработанных материалов в аэродинамических трубах показало их высокую чувствительность и информативность при исследовании структуры пристенных течений при дозвуковых и трансзвуковых скоростях потока (Рис.2) [2].

Список литературы:

1. Жаркова Г.М., Коврижина В.Н. Тонкопленочные жидкокристаллические индикаторы полей температур и касательных напряжений на поверхности аэродинамических моделей Физика ударных волн, горения, детонации, взрыва и неравновесных процессов: коллективная монография / под ред. Левина В.А., Фомина Н.А., Форткова В.Е. Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова, 2014. С. 125–136.
2. Жаркова Г.М., Коврижина В.Н., Петров А.П., Подъячев С.П. Панорамная диагностика касательных напряжений на стенке канала с выступом с помощью жидких кристаллов // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Том 23. № 6. С. 865–873.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект АААА-А17-117030610137-0)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Зарвин А.Е., Каляда В.В., Яскин А.С., Дубровин К.А., Художитков В.Э., Чиненов С.Т.

Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

В связи с разработкой новых космических аппаратов (КА) остро стоит вопрос проведения модельных испытаний газодинамических систем таких аппаратов. Маршевые двигатели вывода КА на орбиту работают преимущественно в условиях слабо разреженного пространства. Моделирование этих процессов относится к задачам аэродинамики. Однако важным элементом управления КА является маневрирование КА на орбите. Истечение рабочих газов из двигателей коррекции и причаливания происходит в сильно разреженном пространстве. Моделирование таких течений является предметом газодинамики разреженных газов.

Во второй половине 20-го века были созданы крупные газодинамические установки для наземного моделирования истечения в вакуум или сильно разреженное пространство струй двигателей КА. Ярким примером этого направления является комплекс газодинамических стендов Института теплофизики [1–2]. Однако финансовые проблемы последнего времени, а также рост технических и диагностических возможностей исследователей привели к постановке задачи миниатюризации лабораторных установок.

Исследования на экспериментальных установках требуют определения условий моделирования струй двигателей космических аппаратов по параметрам сверхзвукового сопла и рабочего газа. Реальные струи двигателей являются источниками высокотемпературных продуктов горения, воспроизведение для которых отношения удельных теплоемкостей и переход к холодным струям модельного газа практически нереализуемо. Поэтому для моделирования необходимо определение критериев подобия, по которым осуществляется приближенное моделирование натурального процесса истечения струи. Принято выбирать геометрию сопла, число Маха, род газа и его температуру, давление торможения, расход газа при истечении в вакуум или степень нерасчетности при истечении в затопленное пространство.

Предложенные в [3] интегральные параметры подобия обеспечивают возможность обойти эти проблемы. Показано, что параметром подобия для струй, истекающих в вакуум или сильно разреженное пространство, является значение относительного импульса газа на срезе сопла и характерный угол поля течения. При равенстве предложенных параметров модельная струя воспроизводит геометрию поля течения натурной струи и реализуется подобие в распределении основных параметров течения газа.

Сложной проблемой моделирования струй КА является обеспечение максимальных расходных характеристик вакуумных откачных систем лабораторных установок, возможности которых несопоставимы с реальными расходами истекающих газов двигательных систем КА. В настоящей работе описана реализация двух возможных путей решения данной про-

блемы: переход к импульсным (квазистационарным) режимам истечения или миниатюризация сопловых систем. Рассмотрены достоинства и недостатки обоих вариантов. Основной проблемой при импульсном истечении является нестационарность газодинамических параметров исследуемых струй. Миниатюризация течений ограничена прежде всего технологическими возможностями изготовления моделей и снижением локализации измерительных систем.

В настоящей работе приведен опыт использования малоразмерного газодинамического комплекса Новосибирского государственного университета [4, 5] для моделирования полей течения блочных струй пилотируемого транспортного корабля. В режиме стационарного истечения комплекс обеспечивает расход газов до 0,2 г/с, в импульсном – до 10 г/с при давлении торможения до 1 МПа и поддержании давления в окружающем пространстве менее 1 Па.

Моделирование струйного истечения газов и газовых смесей в вакуум или разреженное пространство требует использования средств диагностики потоков, обеспечивающих визуализацию сверхзвуковых течений, измерение локальной плотности, концентрации компонентов, скорости и температуры в любых интересующих зонах течения, донного давления вблизи и на срезе соплового блока. В работе описаны методы и средства измерений указанных параметров при использовании свободномолекулярных датчиков, электронно-пучковой диагностики, молекулярно-пучковых средств масс-спектрометрии и времяпролетной методики. На примерах измерений одиночных и блочных струй проиллюстрированы возможности измерительных систем.

Список литературы:

1. Экспериментальные методы в динамике разреженных газов / А.А. Бочкарев, Е.Н. Великанов, А.К. Ребров и др.; Под ред. С.С. Кутателадзе. Новосибирск: Институт теплофизики, 1974. 218 с.
2. Приходько В.Г., Храмов Г.А., Ярыгин В.Н. Крупномасштабная криогенно-вакуумная установка для исследования газодинамических процессов // ПТЭ. 1996. № 2. С. 162–164.
3. Герасимов Ю.И., Ярыгин В.Н. Истечение струй идеального и реальных газов из осесимметричных сопел. Вопросы подобия. 2. Истечение в затопленное пространство // Физико-химическая кинетика в газовой динамике: электронный журнал. 2012, т. 13 (2), с. 1–26.
4. Зарвин А.Е., Каляда В.В., Яскин А.С. и др. Экспериментальная установка для плазмохимических исследований // ПТЭ. 2016. № 6. С. 50–56.
5. Zarvin A.E., Kalyada V.V., Madirbaev V.Zh. et al. Condensable supersonic jet facility for analyses of transient low-temperature gas kinetics and plasma chemistry of hydrocarbons // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. V. 45. No. 5. P. 819–827.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Прикладная физика» НГУ при финансовой поддержке грантов Министерства образования и науки РФ 3.5918.2017/ИТР и 3.5920.2017/ИТР

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКА В МОДЕЛЬНОЙ ГИДРОТУРБИНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ АНЕМОМЕТРИИ И ВИДЕО**Кабардин И.К., Меледин В.Г., Наумов И.В., Аникин Ю.А., Павлов В.А., Семенов Д.О.**Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Повышение эффективности, надежности и качества работы гидротурбин и других гидротехнических устройств актуально в связи с острой конкуренцией на мировом рынке и с тенденцией роста требований к энергоэффективности и безопасности.

Гидродинамическое проектирование турбин и подобных систем производится путем анализа и вариации геометрии при численном моделировании характеристик течений в проточном тракте. Для описания реальных течений в различных технических устройствах приемлемую точность численного решения можно получить только при такой расчётной сетке, ячейки которой меньше самого мелкого вихря. Это требует очень больших затрат расчётного времени даже на современных компьютерах. Поэтому на практике используются различные модели турбулентности, упрощающие расчёт реальных потоков [1]. Все модели турбулентности обладают одним общим недостатком: заранее нельзя сказать, какое из полуэмпирических предположений о связи между турбулентным касательным напряжением и осредненным движением потока наиболее близко соответствует физической действительности. Поэтому любая математическая модель должна быть верифицирована при помощи экспериментальных исследований. Проверка соответствия результатов численного моделирования реальным характеристикам турбулентного течения проводится на специальных гидродинамических стендах с применением современных измерительных систем.

Целью работы являлось создание методики для комплексного и согласованного использования лазерной и видео систем при проведении исследований потока в модельной гидротурбине.

Указанная методика необходима при проведении модельных испытаний новых проточных частей для решения следующих задач: прогнозирование нестационарных явлений на натурных гидротурбинах (кавитация, пульсации давления), совершенствование методов проектирования проточных частей, верификация численных моделей расчета потока в проточной части гидротурбин [2–3].

В ходе работы выполнен обзор и анализ существующих методов исследования (методов визуализации и измерений скоростей) потоков с помощью лазерной и видео техники при исследованиях и совершенствовании гидротурбин. Установлено, что для исследований качественных и количественных параметров кинематических параметров гидропотоков необходимо использовать высокоточные методы диагностики потока за рабочим колесом, такие как ско-

ростная визуализация в сочетании с точечными измерениями методом лазерной доплеровской анемометрии. Возможно сочетание скоростной визуализации с методами, основанными на измерении скорости потока по анализу изображений треков частиц в потоке (Particle Tracking Velocimetry).

Разработаны алгоритмы совместного использования лазерной и видео техники применительно к условиям испытаний на гидравлических стендах. Выполнена модернизация лазерных доплеровских анемометров «ЛАД-0xx», с целью увеличения быстродействия и чувствительности регистрирующего рассеянное излучение детекторов. Разработана методика исследования высокочастотных процессов за кромками лопастей (вихри Кармана) с использованием комплекса «Трек-S 07» (ИТ СО РАН) и высокоскоростной видеокамеры.

Разработана комплексная методика использования лазерной и видео техники в условиях испытаний на стендах лаборатории водяных турбин Ленинградского металлического завода для проведения лазерных измерений полей скоростей и видеозаписи кавитационных явлений на базе интеграции лазерных комплексов («ЛАД-0xx», «Трек-S 07»), созданных в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (ИТ СО РАН) и ОАО «ИОИТ» [4–5].

Список литературы:

1. Губин, М. Ф. Отсасывающие трубы гидроэлектростанций. М.: Энергия, 1970. – 270 с.
2. Alekseenko S.V., Kuibin P.A., Okulov V.L., Shtork S.I. Vortex Precession in a Gas-Liquid Flow // Heat Transfer Research, – 2010. Vol. 41(4) P. 467–479.
3. Naumov I.A., Meledin V.G., Pavlov V.A., 2002. An Experimental Investigation of the Flow Produced in a Rectangular Container by Rotating Disk using LDA // Optical Methods for Data Processing in Heat and Fluid Flow. Suffolk, UK: Professional Engineering Publishing, 2002. P. 25–37.
4. Высокоскоростная система видео наблюдения за вихрями в лопастных системах моделей гидротурбин. Инструкция по эксплуатации. СПбГЭТУ 2009.
5. Система лазерного сканирования пространственного потока в реальном времени «Трек-s 07». Техническое описание и инструкция по эксплуатации. P5 185 00 00 00 ТО и ИЭ. ИТ СО РАН, Новосибирск, 2008 г. 53 с.

Экспериментальное исследование потока в модельной гидротурбине выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (AAAA-A17-117030910025-7), разработка комплексной методики исследования потока выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 18-31-20036)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ СПАЛАРТА-АЛМАРЕСА И МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА РЕЙНОЛЬДСОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МАССОПЕРЕНОСА УПРАВЛЯЕМЫМ ПОВОРОТНО-ДИВЕРГЕНТНЫМ ПОТОКОМ

Кабардин И.К.¹, Яворский Н.И.¹, Меледин В.Г.¹, Правдина М.Х.¹, Гордиенко М.Р.¹, Езендеева Д.П.¹, Какаулин С.В.¹, Усов Э.В.², Климонов И.А.², Кротов С.В.¹, Бакакин Г.В.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН
115191, Россия, Москва, ул. Большая Тульская, 52

Научная проблема такого рода возникает в химии и катализе, в механике при оптимизации массопереноса за счет управления потоком. Эффективность массопереноса обусловлена равномерностью полей скорости и мелкомасштабной турбулентности в реагирующем потоке. Потоки реагентов в реальных установках и реакторах работают в условиях сложной геометрии с поворачивающимися и расширяющимися участками, в которых формируются пристенные струи, происходят отрывы и присоединения потока, формируются зоны возвратного течения. Подобные эффекты увеличивают гидродинамическое сопротивление потока и ухудшают равномерность турбулентного массопереноса. При численном моделировании таких явлений требуется верификация и модернизация моделей турбулентности для адекватного описания массопереноса.

В работе проведен анализ характеристик турбулентного массопереноса в поворотно-дивергентном течении при управлении потоком с возможностью формирования различной интенсивности турбулентности набегающего потока. Расход газа изменялся в диапазоне 50–250 н. м³/ч. При диагностике характеристик турбулентного массопереноса применен метод лазерной доплеровской анемометрии. Проведена верификация численных расчетов методами вычислительной гидродинамики по результатам экспериментальных исследований. При численном моделировании поворотно-дивергентного течения использованы различные модели турбулентности с рекомендованными диапазонами параметров, лежащими в границах применимости для данного типа течения [1]. Моделирование основано на применении полуэмпирических моделей турбулентности на основе уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу и метода моделирования крупных вихрей. Среда считается несжимаемой и изотермической. Для замыкания осредненных уравнений использованы полуэмпирические модели турбулентности: модель Спаларта-Алмареса [2] и модель переноса Рейнольдсовых напряжений [3]. Анализ результатов численного моделирования показал формирование ярко выраженной пристенной струи в поворотно-дивергентном течении и формирование зон возвратного течения.

Верификация численного моделирования (для моделей Спаларта-Алмареса и модели переноса Рейнольдсовых напряжений показана на рис. 1), выполненная измерениями кинетических параметров методом лазерной доплеровской анемометрии, показала, что модели турбулентности адекватно моделируют поворотно-дивергентное течение только до

формирования отрывов потока и образования зон возвратного течения [4–5].

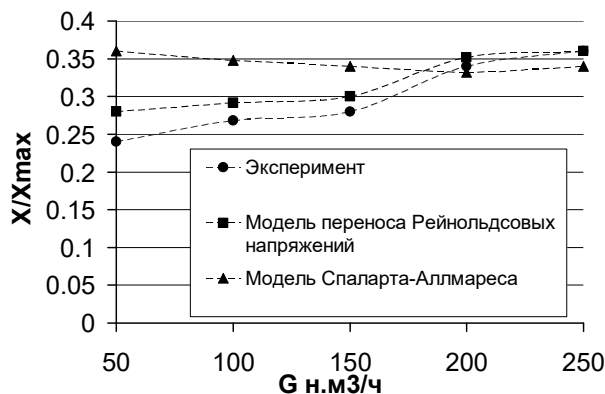


Рис. 1. Значение величины зоны рециркуляции после поворотно-дивергентного устройства при различных значениях расхода.

В качестве параметра, по которому оценивалось применимость той или иной модели турбулентности выбрана ширина зоны возвратного течения. Значение величины зоны рециркуляции после поворотно-дивергентного устройства при различных значениях расхода (рис. 1) показала, что модель переноса Рейнольдсовых напряжений наиболее близко совпадает с экспериментом, а модель Спаларта-Алмареса не совпадает с экспериментом.

Список литературы:

1. Versteeg H.K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Fi-nite Volume Method. Longman Scientific and Technical. 1995. 257 p.
2. Spalart P.R., Allmaras S.R. A one-equation turbulence model for aerodynamics flows // La Recherche Aerospaciale. 1994. Vol. 1. P. 5–21.
3. Launder B.E., Spalding D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1974. Vol. 3. P. 269–289.
4. Wilcox D. C. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries. Inc. La Canada. California. 1998.
5. Walters D.K., Cokljat D. A Three-Equation Eddy-Viscosity Model for Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulations of Transitional Flow // Journal of Fluids Engineering. 2008. Vol. 130. P. 121401–1–121401–14.

Экспериментальное исследование кинематических свойств потока выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (AAAA-A17-117030910025-7), исследование границ применимости моделей турбулентности выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 18-31-20036)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОРБЕНТОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА С КОМПОНЕНТАМИ СИНТЕЗ-ГАЗА

Каграманов Ю.А., Рыжков А.Ф., Тупоногов В.Г., Никитин А.Д.

Уральский федеральный университет,
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

На сегодняшний день развиваются и запускаются энергетические угольные технологии IGCC с HGC, отличающиеся большей экономичностью и меньшими выбросами. HGC работает благодаря сорбентам на основе оксида цинка. Помимо целевой реакции замещения сероводорода с оксидом цинка, возможны побочные реакции редукиции оксида в восстановительных компонентах синтез газа, а так же редукиция сульфида цинка с образованием карбонил сульфида. Каждый процесс по отдельности в литературе не освещался в рамках системы HGC, но был изучен и обобщен в данной работе.

Термо-гравиметрический анализ (ТГА) реакции замещения рассматривался в [1–5], ТГА реакций редукиции – в водороде [6], монооксиде углерода [7] и метане [8].

Для описания массообмена в частице сорбента используется зернистая модель, где частица представляется в виде массива зерен. Зерна одинаковы по размеру и физическим свойствам (плотности, коэффициенты диффузии, степени конверсии). По отдельности зерна подчиняются модели стягивающегося ядра: имеют ядро активного компонента (ZnO для прямой целевой реакции) и кору из твердого продукта реакции (ZnS для прямой целевой реакции).

Конечным результатом обработки является зависимость константы скорости реакции от температуры, выраженная в экспоненциальной форме через предэкспоненциальный множитель и энергию активации.

Поскольку в реакции замещения учитывается диффузионное сопротивление коры твердого продукта,

$$R_1 = \frac{1}{R_{sh}}(C_{sh} - C_c)$$

то при определении константы скорости реакции (если порядок реакции равен единице) оно учитывается вместе с кинетическим сопротивлением ядра.

$$k_1 = \frac{1}{\left[\frac{C_{sh}}{R_1} - R_{sh} \right] S_g}$$

Для получения константы скорости реакции привлекается следующие эмпирические данные: зависимость коэффициента диффузии коры от температуры, плотность сорбента, удельная поверхность сорбента, результаты ТГА.

Поскольку при редукиции оксида металла в восстановительной среде корка из твердого вещества не образуется, а ядро уменьшается, процесс массопереноса описывается лишь законом действующих масс

$$R_2 = k_2 \cdot C_c^{n_2} \cdot S_g$$

Обработка позволила сопоставить результаты опытов с литературными данными.

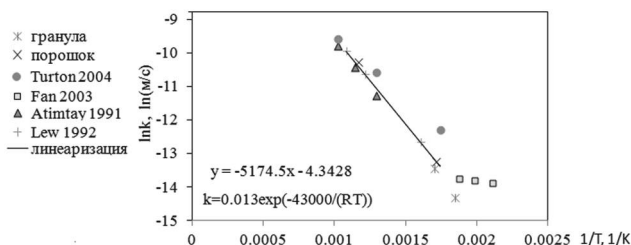


Рис.1 Зависимость константы скорости реакции замещения от температуры в аррениусовых координатах

Константа скорости реакции определяется химическими реагентами и температурой вне зависимости от параметров опытов (расход газа, концентрация реагента, масса навески, размер частицы), что видно из рис. 1.

Получены зависимости констант скоростей побочных реакций сорбентов от температуры при взаимодействии с H₂, CO, CH₄, происходящих в интервале 550–1000°C. Наибольшую скорость имеет реакция с метаном при температуре 850–1000°C, взаимодействие с H₂ и CO происходит менее интенсивно.

Результаты позволили количественно описать процесс очистки газа и разрушение сорбента под действием восстановительных компонентов синтез газа. С ростом температуры происходит резкая интенсификация побочных процессов, губительных для сорбента.

Список литературы:

1. Turton, R. Evaluation of zinc oxide sorbents in a pilot-scale transport reactor sulfidation kinetics and reactor modeling / Ind. Eng. Chem. Res., 2004.
2. Fan, H. Microkinetics of H₂S Removal by Zinc Oxide in the Presence of Moist Gas Atmosphere / Journal of Natural Gas Chemistry, 2003.
3. Atimtay, A. The use of zinc oxide sorbents to remove hydrogen sulfide from coal gases / New Orleans, 1991.
4. Lew, S. The reduction of zinc titanate and zinc oxide solids / Chemical Engineering Science, 1992.
5. Kagramanov, Y. Syngas clean-up system kinetics investigation / Thermal Science, 2018.
6. Gioia F. Experimental study of the direct reduction of sinterized zinc oxide by hydrogen / Chemical Engineering Science, 1977.
7. Guger C. Kinetics of zinc oxide reduction with carbon monoxide / Metallurgical Transactions, 1971.
8. Steinfeld A. Solar thermal production of zinc and syngas via combined ZnO-reduction and CH₄ reforming process / Int. J. Hydrogen Energy, 1995.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПОЖАРООПАСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРОВ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕХНИКИ

Касымов Д.П.¹, Агафонцев М.В.¹, Рейно В.В.², Перминов В.В.¹, Мартынов П.С.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,

634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

² Институт оптики атмосферы СО РАН,

634055, Россия, Томск, пл. Академика Зуева, 1

При распространении лесных низовых и верховых пожаров выделяется большое количество тепла, которое может стать причиной воспламенения деревянных строений в населенных пунктах, расположенных близко к границе леса.

В строительстве в качестве несущих конструкций, как правило, используют древесину хвойных пород, а как отделочные материалы применяется древесина лиственных пород. В литературе имеется большое количество экспериментальных работ по исследованию пожарной опасности древесины, которые свидетельствуют о влиянии различных факторов на ее пожароопасные показатели (порода и разновидность древесины, условия и продолжительность эксплуатации, влажность, интенсивность пожара и др.). Среди них можно отметить работы [1–3].

В настоящее время при исследовании процессов горения и природных пожаров активно применяются современные методы инфракрасной (ИК) диагностики.

Для оценки скорости обугливания в результате теплового воздействия в лабораторных условиях была подготовлена следующая лабораторная база, изображенная на (рис. 1).

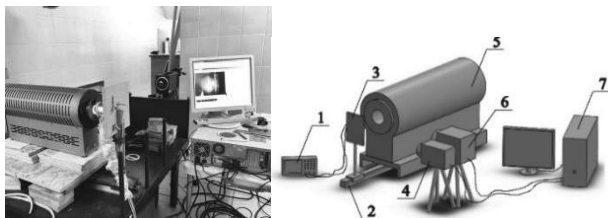


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – осциллограф Tektronix TDS-1002; 2 – оптический рельс; 3 – каретка с подставкой; 4 – видеокамера; 5 – модель абсолютно черного тела; 6 – инфракрасная; 7 – персональный компьютер.

Экспериментальное оборудование включало: инфракрасная камера научного класса JADE J530SB с использованием оптического фильтра, с рабочей длиной волны 2.5–2.7 мкм; видео камера Canon HF R88; излучатель АЧТ-45/100/1100 с диапазоном изменения температуры от 100 до 1100°C, используемый в качестве модели абсолютно черного тела (АЧТ), который имитирует источник теплового излучения с излучательной способностью, близкой к 1, с апертурой, равной 45 мм; датчик теплового потока Hukseflux SBG01 с рабочим диапазоном 0–100 кВт/м².

Методика проведения эксперимента по оценке скорости и глубины обугливания выбранных материалов в результате теплового воздействия от эталонного источника представлены в работе [4].

В качестве образцов древесных строительных материалов использовались фанера, древесностружечная плита (ДСП), ориентированно-стружечная плита (ОСП).

Использование ИК диагностики позволило оценить пожароопасные характеристики исследуемых образцов древесных строительных материалов в результате воздействия теплового потока. Были получены данные по максимальной температуре на поверхности, подверженной тепловому воздействию. В частности, для рассматриваемых образцов среднее значение температуры на поверхности составило 650°C.

Предложена оригинальная методика постановки геометрии эксперимента с регистрацией ИК-изображения температурного поля торца исследуемого образца при воздействии на его фронтальную поверхность теплового потока различной интенсивности.

Проведено экспериментальное исследование влияния мощности теплового потока на характеристики воспламенения и обугливания древесных строительных материалов с применением бесконтактных методов ИК диагностики в узких спектральных диапазонах инфракрасных длин волн.

Показано, что эффективность обработки поверхностями огнезащитными пропитками разных производителей поверхностей выбранных строительных материалов не превышает 30% на основе метода определения времени воспламенения, скорости и глубины обугливания.

Полученные результаты могут служить в качестве дополнительных рекомендаций при разработке методов испытаний строительных материалов и огнезащитных составов на пожарную опасность.

Список литературы:

1. Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Горение и пожарная опасность древесины // Пожаровзрывобезопасность. 2012. № 21 (1). С. 19–32.
2. Chandler C., Cheney P., Thomas P., Traubaud L., Williams D. Forest fire behavior and effects (Fire in Forestry) // New York: John Wiley and Sons, 1983. V. 1. 450 p.
3. Гришин А. М. Общая физико-математическая модель зажигания и горения древесины // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2010. № 2. С. 60–70.
4. Д.П. Касымов, М.В. Агафонцев, В.В. Перминов, В.В. Рейно, П.С. Мартынов Исследование влияния мощности теплового потока на характеристики воспламенения и обугливания древесных строительных материалов с применением методов ИК диагностики // Вестн Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2019 (в печати).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00232)

ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЯХ ВОЗДУШНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ И СУХИХ ГРАДИРЕН

Кондратьев А.В.^{1,2,3}, Птахин А.В.^{1,2,3}, Крылов В.С.^{1,3}, Корлякова Е.Ю.^{1,2}

¹ ЗАО Научно-производственное внедренческое предприятие «Турбокон»,
248010, Россия, Калуга, ул. Комсомольская роща, 43

² КФ ФГБОУ ВО «МГТУ имени Н.Э. Баумана (НИУ)»,
248000, Россия, Калуга, ул. Баженова, 2

³ ФГБОУ ВО «Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского»,
248023, Россия, Калуга, ул. Ст. Разина, 26

При введении в эксплуатацию новых электростанций в настоящее время остро стоит вопрос охлаждающей воды: высокая цена водопользования и ужесточение экологических требований заставляют отказываться от традиционных систем водного охлаждения. По этой причине на реконструируемых и строящихся электростанциях водоохлаждаемые конденсаторы заменяют на сухие воздушные вентиляторные градирни (далее СВВГ) и воздушные конденсаторы (далее ВК).

В России мал опыт эксплуатации СВВГ и ВК. Кроме того, паспортные характеристики, заявленные производителем, не всегда подтверждаются, поэтому требуется проведение промышленных испытаний эксплуатируемого оборудования на соответствие заявленным характеристикам. Основные причины ухудшения работы СВВГ и ВК:

- загрязнение поверхностей теплообмена (далее ТО);
- нерасчетные расходы воздуха через ТО поверхности, снижение расходов воздуха приводит к уменьшению коэффициентов теплопередачи и, как следствие, потере эффективности СВВГ и ВК.
- несоответствие реальных показателей СВВГ и ВК проектным.

При проведении испытаний необходимо максимально точно измерять параметры рабочих сред. Часть измерений выполняется с использованием штатных щитовых приборов АСУ СВВГ и турбоагрегата. Датчики штатных АСУ, измеряющие критически важные параметры, должны быть продублированы с помощью внешней СИ с индивидуальной калибровкой в измеряемом диапазоне.

При проведении промышленных испытаний СВВГ и ВК используется широкая измерительная база, включающая в себя дорогостоящее оборудование, такое как ультразвуковые расходомеры, откалиброванные термоэлектрические преобразователи, измерительные комплексы для определения расхода воздушного потока на выходе из вентилятора, мультанализатор для измерения воздушного шума, тепловизор и т.д.

Кроме того, в промышленном эксперименте не всегда есть возможность работы на интересующем испытателей режиме, поскольку станция несёт нагрузку, величина которой определяется требованиями электросетей. По этой же причине отсутствует возможность демонтажа штатных измерительных приборов с целью их совместной калибровки вместе с измерительными каналами.

К примеру, имея неучтённые погрешности измерений в пределах 1–2°C, показания датчиков темпе-

ратуры теплоносителя на входе и выходе из теплообменной поверхности будут вполне актуальны для управления градирней или ВК. Однако при оценке величины теплосъёма на режимах с низкой нагрузкой температурный напор теплоносителя может иметь сопоставимую величину порядка 3–5°C и, соответственно, высокую относительную ошибку.

По причинам, перечисленным выше, проведение и обработка промышленных испытаний ВК и СВВГ имеют ряд особенностей.

Определять величину тепловой нагрузки необходимо одновременно по каждому из двух теплоносителей (воздух и пар/вода), а затем составлять уравнение тепловых балансов и вычислять величину их невязки.

Расход охлаждающего воздуха определяется из показаний ~20 датчиков скорости, расположенных на выходе из вентилятора на двух-четырёх его диаметрах. При измерении температуры охлаждающего воздуха на входе в теплообменные модули определяется наличие рециркуляции тёплого воздуха. Для этого проводятся измерения температуры воздуха под теплообменниками по углам установки, а также на расстоянии более 50 метров от неё.

Кроме того, испытания не всегда удаётся провести на стационарном режиме работы станции, в таких случаях требуется принимать во внимание тепловую инерционность конструкции и теплоносителя в замкнутом контуре.

При сравнении полученных показателей с проектными необходимо приводить экспериментальные данные к проектным условиям с использованием специальной методики.

Список литературы:

1. Мильман О.О., Федоров В.А., Воздушно-конденсационные установки. М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 208 с.
2. Справочник по теплопередаче. Т. 1. / под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.
3. Федоров В.А., Мильман О.О., Ананьев П.А., Дунаев С.Н., Колесников Н.В., Шифрин Б.А. Теплогидравлические процессы в воздушных конденсаторах паротурбинных установок. Вестник МЭИ, 2012. № 2. С. 5–12.
4. ГОСТ 10921–90 Вентиляторы радиальные и осевые. Методы аэродинамических испытаний. – М., Издательство стандартов, 1991, 32 с.
5. Крюков Н.П. Аппараты воздушного охлаждения. – М.: Химия, 1983, 168 с.
6. Федоров В.А., Мильман О.О., Ананьев П.А., Колесников Н.В., Дунаев С.Н., Птахин А.В., Кондратьев А.В. Результаты экспериментальных исследований расходно-напорных характеристик вентилятора воздушного конденсатора паротурбинных установок. Вестник МЭИ, 2013. №2. С. 26–30.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЧАСТЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА САМОСМЕЩЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Куликов Д.В., Чубов А.С., Садбаков О.Ю., Кротов С.В., Овчинников Н.Н.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Безопасность и бесперебойное снабжение потребителей электрической и тепловой энергией определяется надежной работой энергетических установок. Своевременное обнаружение опасных режимов позволяет существенно снизить затраты на проведение ремонтно-восстановительных работ, а во многих случаях предотвратить серьезные техногенные аварии. С увеличением мощности возрастает тяжесть последствий аварий и, следовательно, растет актуальность прецизионной бесконтактной диагностики вращающихся частей нагруженных энергетических установок. Бесконтактная диагностика вращающихся ответственных частей энергетических установок связана с решением ряда серьезных научных и технических проблем [1].

К настоящему моменту на большинстве электрических станций России и стран СНГ решение о необходимости корректировки формы статора и ротора генераторов основывается на результатах измерений их геометрии в статическом состоянии. Производится ручной замер геометрических параметров ротора и статора в нескольких положениях [2]. При этом многие исследователи отмечают, что определяемый геометрией воздушный зазор между ротором и статором в работающем генераторе может существенно отличаться от зазора в статическом состоянии [3, 4].

Наиболее адекватно задачу решают измерители на основе полупроводниковых лидаров. Измерители располагаются на значительном удалении в области низкой концентрации электромагнитных, вибрационных и температурных нагрузок. При увеличении биений вала (например, при прохождении турбины энергетической установки через механический резонанс) такие датчики не повреждаются.

Целью работы является совершенствование методов измерения повышенной точности для выявления отклонений геометрии вращающихся нагруженных элементов энергетических установок.

Метод основан на использовании принципа частотной модуляции оптического когерентного источника, применяемого в низкокогерентных полупроводниковых FMCW-лидарах. Принцип действия основан на эффекте самосмещения в кристалле полупроводникового лазера [5].

Оптическая частота излучения модулируется сигналом заданной частоты. Излучение разделяется на зондирующее – направленное на объект, и опорное, используемое в качестве локального оптического гетеродина. Часть рассеянного объектом излучения попадает обратно в полупроводниковый лазер. Частота излучения полупроводникового лазера модулируется за счет линейной модуляции тока накачки. За время

прохождения излучения до объекта и обратно частота изменяется на Δf . Рассеянное поверхностью ротора или статора энергетических установок принятое излучение смешивается в кристалле лазера с опорным.

В сигнале встроенного в лазер фотодиода контроля мощности появляется частота биения зондирующего и рассеянного излучения. Скорость движения объекта в направлении луча vt и расстояние до объекта Da связаны с частотой биения Δf и могут быть вычислены из соотношений:

$$f_R = \frac{f_1 + f_2}{2} = \frac{4D_a \cdot \Delta f}{c \cdot T_{\text{mod}}} \quad (1)$$

$$f_D = \frac{f_2 - f_1}{2} = \frac{2v_t}{\lambda} \quad (2)$$

Высокая точность измерений обеспечена оригинальными методами цифровой обработки сигналов, фазовым осреднением, доплеровским сигнальным препроцессингом реального времени, согласованным с электронно-оптическими параметрами FMCW-лидара.

В результате разработан метод бесконтактного измерения геометрии вращающихся частей энергетических установок на основе эффекта самосмещения лазерного излучения, фазового осреднения и цифровой фильтрации. Предложенный метод позволил снизить ошибку результатов измерения до 1,5% и реализовать режим мониторинга геометрии вращающихся частей энергетических установок под полной нагрузкой.

Список литературы:

1. Брызгалов В. И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций. – производственное издание. – Красноярск: Сибирский ИД «Суриков», 1999. – 560 с. – ISBN 5786700197
2. Нецеевский А.Б. и др. Устранение асимметрии воздушного зазора в гидрогенераторе типа СВ 1340/150–96 / Нецеевский А.Б. и др. Электрические станции, 1975, – № 1.
3. P. Talas, P. Toom, Dynamic Measurement and Analysis of Air-Gap Variations in Large Hydroelectric Generators. IEEE, 83 WM 226–8, 1983, 9 p.
4. Трунин Е.С. Эксплуатационный контроль технического состояния гидроагрегатов / Скворцов О.Б. // Электрические станции. – 2010. – № 6 – С. 38–45.
5. Куликов Д.В. Лазерная технология определения геометрии ротора под нагрузкой / Аникин Ю.А., Двойнишников С.В., Меледин В.Г. // Электрические станции. – 2010. – № 7 – С. 39 – 43.

*Работа выполнена в рамках
государственного задания ИТ СО РАН*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ
НА ЭЛЕКТРООБОГРЕВАЕМЫХ МОДЕЛЯХ ТВСА****Куприянов А.В.¹, Молодцов А.А.¹, Осин А.Б.¹, Сорокин В.Д.¹, Морозкин О.Н.²**¹ АО «ОКБМ Африкантов» 603074, Россия, Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15² АО «ТВЭЛ» 115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, 49

ТВСА – тепловыделяющая сборка альтернативной конструкции с жёстким уголковым каркасом, эксплуатируемая на ВВЭР-1000 Калининской АЭС, АЭС Украины, Болгарии и Чехии. Жёсткий каркас ТВСА сформирован из дистанционирующих решёток и шести уголков жёсткости. Одним из важнейших направлений развития ТВСА является применение перемешивающих решеток-интенсификаторов теплообмена (ПР) для выравнивания температур, снижения локального паросодержания, повышения эксплуатационной надежности и теплотехнических запасов.

Начиная с 1999 года в АО «ОКБМ Африкантов» на теплофизическом стенде Л-186 проводятся исследования кризиса теплоотдачи на электрообогреваемых моделях ТВСА, направленные на поиск оптимальной конструкции ПР и обоснование теплотехнической надёжности различных модификаций ТВСА для внедрения на АЭС. В качестве показателя эффективности применяемых ПР используются значения критической мощности моделей ТВС и критического теплового потока.

Первые исследования проводились на моделях без ПР с различным шагом и типом дистанционирующих решёток (ДР) в обоснование модификаций ТВСА без ПР и являлись базовыми для оценки эффективности ПР.

Для обоснования теплотехнических характеристик ТВСА с ПР был выполнен комплекс экспериментальных исследований на теплофизическом стенде Л-186 АО «ОКБМ Африкантов». Работы выполнялись по договорам с АО «ТВЭЛ».

Стенд Л-186 включает два замкнутых водяных контура: основной контур, и вспомогательный контур, служащий для снятия тепла с основного контура. С теплообменника вспомогательного контура тепло снимается технической водой.

Основные характеристики стенда:

- электрическая мощность моделей – до 3000 кВт;
- расход теплоносителя через модель – до 30 м³/ч;

- давление теплоносителя – до 18 МПа;
- температура на входе в модель – до 310 °С.

Все узлы, арматура и трубопроводы стенда, имеющие контакт с водой, изготовлены из коррозионно-стойкой стали марки 08Х18Н10Т.

Представительность экспериментальных исследований обеспечивалась:

- использованием модельных сборок с натурными геометрическими характеристиками элементов;
- использованием фрагментов или натуральных дистанционирующих и перемешивающих решеток;
- проведением исследований при натуральных параметрах теплоносителя;
- использованием аттестованной системы измерения;
- применением апробированной методики измерений.

Исследования были выполнены в широком диапазоне режимных параметров теплоносителя на электрообогреваемых моделях ТВСА с наличием и без наличия имитатора направляющего канала (необогреваемого). Исследованы модели с равномерным энерговыделением, аксиальной и радиальной неравномерностью энерговыделений. Исследования выполнены для двух типов неравномерного аксиального поля энерговыделений с максимумами в центральной и верхней частях моделей.

В результате экспериментов получено, что применение ПР различной модификации обеспечивает увеличение критической мощности моделей на ~10–15% по сравнению с ТВСА без ПР.

Получена представительная база экспериментальных данных для ТВСА с ПР, применение которых позволяет повысить теплотехнические запасы в активной зоне и обеспечить высокие технико-экономические характеристики действующих и перспективных ВВЭР.

ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДЫ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ ПУЛЬСАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ

Малахов А.О., Ларионов В.М.

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, Россия, Казань, Кремлевская, 18

Развитие технологий горения различных видов топлив, утилизации отходов нефтехимических производств и прочих отходов приводит к необходимости исследования высокоэффективных режимов горения. Одним из перспективных методов сжигания углеводородного топлива является организация пульсационного режима горения [1]. В данном режиме происходит значительное ускорение тепломассообменных процессов по сравнению с равномерным горением.

В настоящее время, имеется необходимость в исследовании условий возбуждения акустических колебаний в пульсационном режиме горения [2]. Данное исследование проводится в специально разработанной экспериментальной установке «Вихревая камера пульсационного горения».

Установка представляет собой горелку, состоящую из трубы, выполненную из авиационной стали, и цилиндрическую камеру с патрубками и поршнем (см. рис. 1). От нижней закрытой части камеры по месту соединения патрубков, образуется «зона подачи горючей смеси». Нижняя часть закрыта регулирующим поршнем, который изменяет объем данной камеры. Вторая область представляет собой зону горения (закрученное пульсирующее пламя). В качестве топлива используется смесь пропан-бутана и воздуха, подающуюся в горелку через четыре тангенциальных сопла. Хроматографический анализ состава смеси пропан-бутана показал, что топливо состоит из пропана (74,37%), метана (5,2%), изобутана (8,77%), бутана (6,9%), сероводорода (4,13%) и воды (0,63%). Топливоздушная смесь подавалась в соотношении 1 к 23,24 л/мин топлива к воздуху. Данное соотношение является оптимальным для сжигания топлива указанного состава. Воспламенение смеси осуществляется свечой поджига. Установка подключена к цифровым и механическим ротаметрам, градуированным под соответствующие газы. Для измерения температуры внутри горелки используется вольфрам-рениевая термопара ВР-5/20, с толщиной проволоки 0,5 мм. Показания считываются цифровым прибором Ф266. Для измерения амплитуды акустических колебаний, установка оснащена микрофоном, подключаемым к компьютеру.

Было установлено, что разработанная вихревая камера пульсационного горения соответствует требованиям для исследования физического механизма возбуждения акустических колебаний. Были обнару-

жены колебания газа в частотных диапазонах 246–264 Гц и 738–789 Гц, что соответствует первой и третьей гармоникам трубы, закрытой на входе и открытой на выходе.

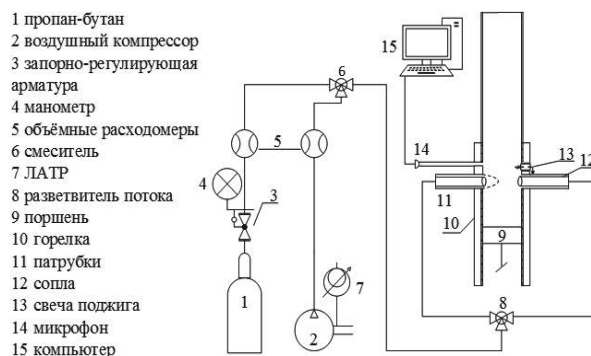


Рис. 1 Схема установки

Были получены данные о распределении температуры в камере сгорания. Измерения проводились с шагом 5 см по оси и вдоль стенки камеры сгорания. После обработки результатов измерений распределение скорости звука было представлено в виде: $c = a - bx$. Первый член зависит от температуры газа в зоне горения, то есть от коэффициента избытка воздуха α . Градиент скорости звука можно записать в виде: $b = b_1(\alpha) - b_2 \times p c$, где $p c$ амплитуда колебаний газа в зоне горения. Наличие второго члена объясняется тем, что колебания газа ускоряют теплопередачу к стенкам, снижая температуру газа на выходе из камеры сгорания. Как известно, этот эффект с ростом амплитуды колебаний газа, становится заметнее.

В дальнейшем, результаты данного исследования позволят разработать математическую модель, с помощью которой можно вычислять частотные характеристики вихревой камеры пульсационного горения и амплитуду установившихся колебаний газа в зависимости от состава топливно-воздушной смеси и геометрических параметров установки.

Список литературы:

1. Semenova, E.V., Larionov, V.M., Iovleva, O.V. Acoustic gas oscillations in coaxial tubes (2017) Journal of Physics: Conference Series, 789 (1), статья № 012049.
2. Ларионов В.М. Автоколебания газа в установках с горением. / В.М. Ларионов, Р.Г. Зарипов // Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2003. – 227 с.

СРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННОГО И ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВАЕМОЙ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ НАТЕКАНИИ СВЕРХЗВУКОВОЙ МИКРОСТРУИ ВОЗДУХА

Маслов Н.А., Анискин В.М., Коротаева Т.А., Цибульская Е.О.

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

Бурное развитие исследований микротечений жидкости и газа мотивировано глобальной миниатюризацией устройств в различных областях техники и появлением большого числа микроэлектромеханических систем, представляющих собой трехмерные мини- и микрообъекты, в которых характерные размеры элементов составляют миллиметры или десятки микрон. В связи с тенденцией к миниатюризации в последние два десятилетия происходит интенсивное развитие теплообменных систем с мини-, микроэлементами. Одним из решений задачи локального охлаждения может являться применение микроструй.

В данной работе исследовалось распределение коэффициента теплоотдачи при натекании сверхзвуковой осесимметричной микроструи газа на нагреваемую пластину. Диаметр сопла составлял 300 мкм. К медной пластине толщиной 15 мм и диаметром 105 мм, помещённой в теплоизолятор из вспененного бетона, снизу теплопроводящим клеем прикреплены керамические нагревательные элементы. Сверху теплопроводящей пастой прикреплена пластина толщиной 500 мкм из полиэфирэфиркетона, который был выбран из-за хорошей устойчивости формы и структуры к изменению температуры, низкой теплопроводности и, в основном, вследствие того, что он себя хорошо зарекомендовал в других экспериментах по исследованию теплоотдачи. Распределение температур на поверхности пластиковой пластины фиксировалось с помощью тепловизионной камеры FLIR SC7300M, температура медной пластины контролировалась термопарами. По разнице показаний рассчитывался тепловой поток, коэффициенты теплоотдачи и числа Нуссельта. Сравнение расчетной температуры поверхности пластины и экспериментальной, определенной по показаниям тепловизора, оказалось неудовлетворительным. Не совпадали ни форма кривых, ни абсолютные значения. Причиной расхождения расчетных и экспериментальных данных, по-видимому, является большая проницаемость пластика для инфракрасного излучения. Вследствие этого измеряемая температура оказывается усреднённой в слое толщиной, равной глубине проникновения инфракрасного излучения в пластик. На основе проведенных экспериментов и расчетов был сделан вывод о непригодности пластика из полиэфирэфиркетона для тепловизионного метода исследования теплоотдачи именно для микроструй.

В качестве альтернативы был опробован метод определения температуры поверхности на основе флуоресцирующего покрытия на основе родамина Б и оптически прозрачного полимера. Характер флуо-

ресценции такого покрытия зависит от температуры, толщины наносимого покрытия и концентрации красителя. Проведенные методические эксперименты позволили определить необходимую концентрацию родамина в полимере, чтобы глубина проникновения возбуждающего излучения, а соответственно и слоя, по которому усредняется измеряемая температура, будет порядка нескольких микрометров. Данное покрытие наносилось на поверхность нагреваемой пластины. Флуоресценция возбуждалась с помощью излучения синего светодиода, регистрировалась с помощью CMOS видеокамеры с интерференционным фильтром, пропускающим свет в спектральном диапазоне 595–605 нм. В результате гораздо более простыми техническими средствами удалось получить распределения температуры по поверхности пластины с более высоким пространственным разрешением, чем в случае имеющейся тепловизионной системы. Также наблюдается хорошее согласование измеренных данных с расчётными на большей части преграды, за исключением области непосредственного натекания струи на стенку и разворота потока, где наблюдается сложное периодическое вихревое движение.

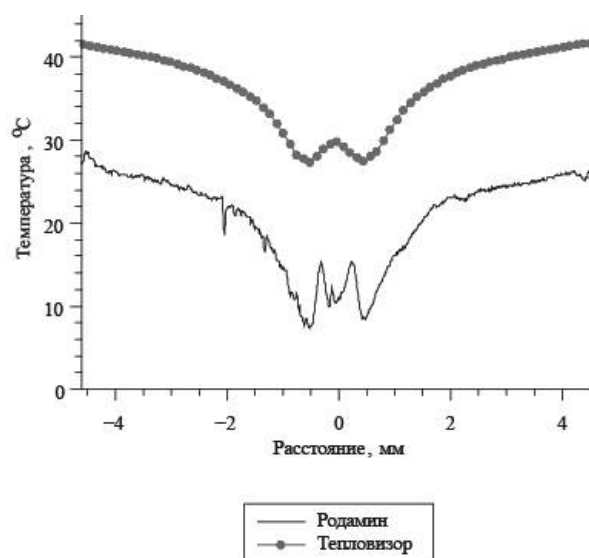


Рис. 1. Сравнение температуры поверхности нагреваемой пластины измеренные тепловизором (•) и флуоресцентным покрытием (—) в зависимости от расстояния до центра пластины (расстояние от среза сопла до пластины 0,9 мм, $n=4$).

Работа поддержана РНФ (грант № 17-19-01157)

МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ ОШИБКИ КАЛИБРОВКИ ТРИАНГУЛЯЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ С ДВУМЯ ФОТОПРИЕМНИКАМИ

Овчинников Н.Н., Двойнишников С.В., Главный В.Г., Садбаков О.Ю., Щепихин И.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Трехмерные измерения формы физических объектов необходимы во многих областях гидро- и аэродинамических исследований [1]. Проблема решается с использованием контактных, на основе координатно-измерительных манипуляторов и щупов, а также бесконтактных методов триангуляции. Контактные методы относительно просты в реализации, но имеют ряд очевидных недостатков и ограничений.

Особенностью бесконтактных оптических методов, таких как «структура из движения», стереозрение, фазовая триангуляция, является принципиальная необходимость калибровки используемых оптических систем. Под калибровкой понимается процесс оценки реализуемых внутренних и внешних параметров триангуляции. Известны различные калибровочные методы, но преимущественно используются 3-х мерные калибровочные эталоны и калибровка плоскостями.

Одним из примеров калибровки плоскостями является метод, представленный в [2]. Метод позволяет калибровать приемник оптического излучения без специализированных калибровочных устройств, получать внутренние и внешние параметры оптической системы, а также коэффициенты искажения изображения. При этом в качестве калибровочного объекта используется плоская поверхность.

Калибровка использует классическую модель камеры обскуры. Взаимосвязь между 3D точкой M и её проекцией на изображении m задается формулой:

$$sm = A[R \ T]M = PM, \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$P = A[R \ T], \quad (3)$$

где s произвольный фактор масштаба, (R, t) – внешние параметры, поворот и перенос, которые связывают пространственную систему координат с системой координат камеры, и A – матрица внутренних параметров камеры. Строится проекционное преобразование между модельной плоскостью и её изображением, после чего задаются ограничения на внутренние параметры камеры. Затем на основе ограничений записываются два однородных уравнения, решение которых уточняется с помощью метода максимального правдоподобия.

Для оценки погрешности калибровки в методе используется разница между координатой 3-х мерной

точки на изображении и её проекции на это же изображение с помощью внутренних и внешних параметров. Оценка выполняется в пикселях и не несет в себе метрической информации. Данная оценка не является объективной, так как используются те же данные, на которых выполнялась калибровка.

Предлагаемый метод использует отложенную выборку изображений, по которой оценивается ошибка. Введен новый критерий, основанный на использовании априорной информации о плоскостности калибратора и среднеквадратичном отклонении координат калибровочного шаблона от плоскости, построенной по точкам. Далее выполняется автоматический поиск калибровки с наименьшей погрешностью из набора калибровочных снимков.

Алгоритм поиска состоит из следующих шагов.

1. Выборка калибровочных снимков делится на калибровочную (количество снимков K) и отложенную.

2. Производится начальная калибровка по всем калибровочным снимкам и оценка погрешности на отложенной выборке.

3. Создается K выборок, размером $(K - 1)$, в каждой из которых отсутствует уникальная пара калибровочных снимков.

4. На K выборках производится калибровка и оценка погрешности.

5. Если наименьшая погрешность среди выборок больше изначальной, алгоритм закончен.

6. Иначе, выборка с наименьшей погрешностью становится калибровочной выборкой, а изначальное значение погрешности становится равным погрешности выборки. Алгоритм повторяется с шага 3.

Предложенный метод обеспечивает минимизацию ошибки калибровки триангуляционного измерителя трехмерной геометрии на основе пар фотоприемников. Достигнута погрешность измерения при использовании камер низкого разрешения на уровне 1%.

Список литературы:

1. Меледин В.Г. Оптоэлектронные информационные системы для науки и промышленности // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 5. № 1. С. 3–12.
2. Z. Zhang. A Flexible New Technique for Camera Calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11):1330–1334, 2000. – 21 с.

*Работа выполнена в рамках
государственного задания ИТ СО РАН*

РАСШИРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ФОТОПРИЕМНИКОВ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЗАТВОРОВ

Рахманов В.В., Аникин Ю.А., Куликов Д.В., Павлов В.А., Щепихин И.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Методы визуализации гидродинамических потоков активно развиваются и совершенствуются. Одним из фундаментальных ограничений в визуализации является ограниченный динамический диапазон фотоприемников [1]. Расширение динамического диапазона обеспечивает увеличение качества и количества получаемой в физических экспериментах информации.

В условиях интенсивных фоновых засветок для расширения динамического диапазона применяют различные подходы: управление временем экспозиции фотоприемника и интенсивностью подсветки [2], введение узкополосной оптической фильтрации фоновой засветки, использование узкого диапазона длин волн зондирующего излучения [3].

При решении ряда экспериментальных научных проблем отсутствует возможность уменьшения временного интервала экспозиции фотоприемника. Например, при отсутствии канала внешней синхронизации необходимо непрерывно регистрировать сигнал фотоприемника для исключения неинформативных интервалов в исследуемом объеме [4]. Цель данной работы – создание метода расширения динамического диапазона фотоприемника при отсутствии внешней синхронизации и наличии интенсивных фоновых помех.

При измерении динамических объектов энергия сигнала от рассеиваемого поверхностью объекта оптического излучения может быть оценена выражением:

$$I(x, y) = k \int_{t=t_0}^{t_0+T} (A(x, y, t) + N(x, y, t)) dt, \quad (1)$$

где t_0 – начальное время открытия затвора фотоприемника, T – длительность экспозиции фотоприемника, k – калибровочный коэффициент, $A(x, y, t)$ – мгновенное распределение интенсивности рассеиваемого излучения на матрице фотоприемника, $N(x, y, t)$ – дополнительная паразитная засветка, обусловленная шумами, фоновой засветкой или температурным излучением поверхности измеряемого объекта (в случае наблюдения за нагретой поверхностью). В случае использования импульсного источника излучения, выражение (1) примет вид:

$$I(x, y) = k \int_{t=t_0}^{t_0+T} (A(x, y, t)L(t) + N(x, y, t)) dt, \quad (2)$$

где $L(t)$ – функция модуляции источника излучения: $L(t)=1$, если излучатель генерирует излучение и $L(t)=0$ в остальных случаях.

В условиях ограниченного динамического диапазона важно минимизировать уровень шумов, вносимых слагаемым $N(x, y, t)$ в итоговое распределение

$I(x, y)$. Это можно добиться снижением времени экспозиции, либо введением дополнительного оптического затвора, обеспечивающего стробирование и оптическую фильтрацию излучения, попадающего на матрицу фотоприемника. Тогда выражение (2) примет вид:

$$I(x, y) = k \int_{t=t_0}^{t_0+T} M(t)(A(x, y, t)L(t) + N(x, y, t)) dt, \quad (3)$$

где $M(t)$ – функция модуляции оптического затвора, определяющая изменение коэффициента ослабления излучения, падающего на фотоприемник.

Для расширения динамического диапазона фотоприемника предложено использовать бытовые активные жидкокристаллические (ЖК) оптические затворы. Их основой являются нематические ЖК структуры, ориентирующиеся вдоль линий электрического поля и пропускающие свет заданной поляризации. Используя внешнюю схему синхронизации импульсов зондирующего освещения и активных оптических затворов, можно регулировать длительность экспозиции приемного изображения на матрице фотоприемника без потери кадров.

В работе предложен метод расширения динамического диапазона фотоприемников в гидродинамических исследованиях на основе применения доступных активных оптических затворов, работающих в синхронном режиме с источником оптического излучения. Предложенный метод обеспечил расширение динамического диапазона фотоприемников в гидродинамических исследованиях более чем в 5 раз.

Список литературы:

1. Алексенко С.В., Меледин В.Г., и др. Развитие оптико-информационных методов, систем и технологий бесконтактной диагностики гидродинамических процессов и трехмерных пространственных структур // Вихревые явления и их влияние на процессы переноса / под ред. С.В. Алексенко и И.В. Наумова; Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. – С. 8–70.
2. I.K. Kabardin, S.V. Dvoynishnikov, V.G. Meledin, I.V. Naumov The distant diagnostics of transparent ice on wind turbine blades on the basis of total internal reflection // Journal of Engineering Thermophysics. – 2016. – № 4. – P. – 504–508.
3. Двоинишников С.В., Меледин В.Г., Куликов Д.В., Павлов В.А., Рахманов В.В. Способ облачной триангуляции толщины горячего проката // Патент РФ № 2574864, приоритет 15.09.2014, зарегистрировано 15.01.2016.
4. Рахманов В.В., Кабардин И.К., Двоинишников С.В. Синхронная визуализация волнового пленочного течения на вращающемся диске // Международный научно-исследовательский журнал №11 (42), Часть 2. Декабрь. – С.89–91.

*Работа выполнена в рамках
государственного задания ИТ СО РАН*

ОБ ОПЫТЕ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

Чертовских П.А.^{1,2}, Серёдкин А.В.^{1,2}, Гобызов О.А.¹, Стюф А.С.^{1,2}, Пашкевич М.Г.³, Токарев М.П.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ),
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

³ Новосибирский государственный университет экономики и управления (НГУЭУ),
630099, Россия, Новосибирск, ул. Каменская, 52

К современным энергетическим технологиям предъявляются все более высокие требования по экологичности и эффективности. Возникают задачи адаптивного управления такими техническими устройствами энергетического оборудования как камеры сгорания, форсунки для диспергирования топлива, котлы и др. Данные объекты управления часто представляют собой нелинейные динамические системы высокого порядка вследствие сложности физико-химических процессов протекающих в них, что делает нетривиальным синтез классических линейных систем управления для них. Так становится актуальным использование нейронных сетей и машинного обучения, как для идентификации систем, так и для создания адаптивных регуляторов.

Нерешенными остаются следующие проблемы: нелинейность объектов управления, осложняющая синтез регуляторов в широком диапазоне параметров, дрейф параметров системы со временем и их зависимость от условий среды.

В данной работе рассмотрена схема гибридного нейросетевого ПИД-регулятора для использования в контуре управления лабораторного газоугольного котла. На рис. 1 представлена его блок-схема. Для обучения нейросетевого блока автоподстройки коэффициентов ПИД-регулятора [1] система управления моделировалась на компьютере и далее использовалась для управления реальным оборудованием. Обучение проводилось методом градиентного спуска, в качестве функции качества управления бралась квадратичная функция задачи оптимального управления от невязки $e(t)$ и сигнала управления $u(t)$.

Достоинство гибридного ПИД-регулятора состоит в том, что он может работать в более широком диапазоне состояний объекта управления [2]. Применительно к котельному оборудованию это может быть использование разных видов топлива, например, углей разного качества или дрейф параметров котла со временем в связи с образованием нагара.

На рис. 2 представлен процесс регулирования расхода воздуха лабораторного газоугольного котла. При этом параметры ПИД-регулятора изменяются динамически, обеспечивая высокую скорость выхода на уставку $r(t)$ и предотвращение перерегулирования.

В работе так же рассмотрены примеры использования прямого самообучающегося нейросетевого регулятора на базе обучения с подкреплением [3] и перспективы его использования в реальных системах управления энергетическим оборудованием.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 19-79-30075) через ИТ СО РАН.

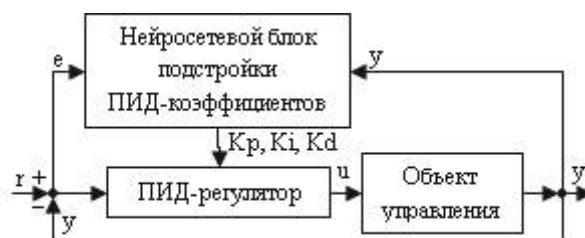


Рис. 1. Блок-схема адаптивного ПИД-регулятора.

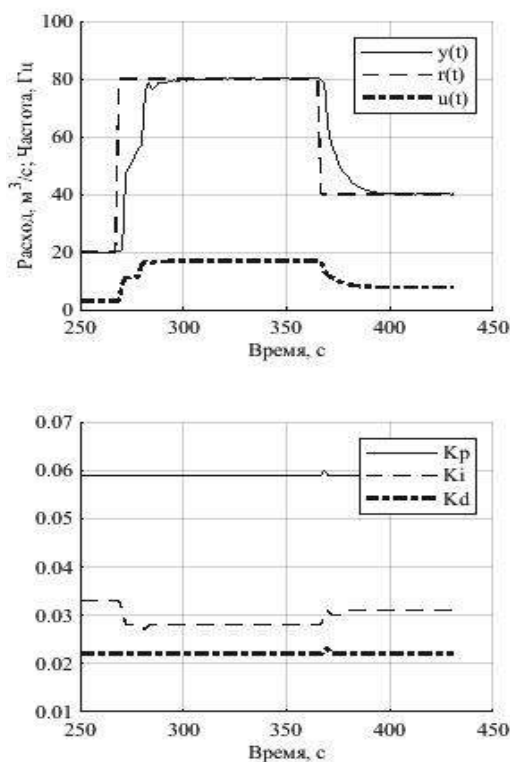


Рис. 2. Фрагмент записи: (сверху) регулирование подачи воздуха в газоугольный котел адаптивным ПИД-регулятором, (снизу) автоподстройка коэффициентов регулирования.

Список литературы:

1. Åström K. J., Hägglund T. PID controllers: theory, design, and tuning. Research Triangle Park, NC: Instrument society of America, 1995. Т. 2., 343 p.
2. Омату С., Халид М., Юсоф Р. Нейроуправление и его приложения //М.: ИПРЖР. 2000. 272 с.
3. Sutton R.S., Barto A.G. Reinforcement Learning: An Introduction MIT Press., 2017, 548 p.



СЕКЦИЯ 7

Теплофизические свойства веществ и новые материалы



Интерметаллические соединения в системах «щелочной металл – висмут» обладают рядом специфических физико-химических свойств. На концентрационных зависимостях удельного электросопротивления жидких систем «щелочной металл – висмут» экспериментально обнаружены острые пики, при которых электросопротивление жидких сплавов в 15–40 раз превышает электросопротивление жидкого висмута [1, 2]. Еще одним интересным явлением является так называемый эффект «химического сжатия», наблюдаемый при образовании таких соединений. Так, например, молярные объемы твердых фаз некоторых составов висмутидов щелочных металлов меньше молярного объема идеального раствора на 30–45% [3, 4]. В литературе такие особенности объясняют тем, что компоненты, входящие в данные системы, сильно различаются по электроотрицательности. По этой причине в висмутидах щелочных металлов помимо металлического типа межатомного взаимодействия в значительной степени проявляется ионная связь [3, 5], что ведет к образованию в расплавах интерметаллических комплексов с частично ионным характером межатомного взаимодействия. Существование таких комплексов в расплавах подтверждается лишь косвенными экспериментальными данными. Развитие теоретических представлений о структуре расплавов висмутидов щелочных металлов сдерживается, в частности, из-за недостатка экспериментальной информации об их термодинамических и, в том числе, транспортных свойствах.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование коэффициента теплопроводности (λ) сплава Cs-Bi эквимолярного состава в широком интервале температур. Измерение λ проводилось методом лазерной вспышки [6] на экспериментальной установке LFA-427 с использованием герметичной измерительной ячейки из нержавеющей стали. Погрешность измерений составила 4–6%. Исходные компоненты цезий и висмут имели чистоту 99,94 масс.% и 99,98 масс.%, соответственно. Операции по приготовлению сплава и заполнению измерительной ячейки проводились в перчаточном боксе с высокочистым аргоном (99,992 об.%), оснащенном аппаратом электрической дуговой сварки и электронными аналитическими весами.

Результаты измерений теплопроводности λ жидкого сплава Cs-Bi представлены на рис. 1. Обработка первичных данных проводилась по трехслойной модели (тигель – расплав – крышка) на основе разработанного пакета программ [6]. Решалась двумерная задача в цилиндрических координатах. Подгоночными параметрами для расчета служили теплопроводность расплава и степень черноты внешних границ ячейки. При обработке свойства материала ячейки, а также плотность и теплоемкость исследуемого спла-

ва считались заданными. Изменение толщины слоя расплава учитывалось через тепловое расширение материала ячейки.

Аппроксимация полученных результатов в интервале температур 670–1173 К методом наименьших квадратов дала уравнение:

$$\lambda(T) = -0,023 + 0,002 T - 2,419 \times 10^{-7} T^2, \quad (1)$$

где λ в Вт/(м К), T – температура в К.

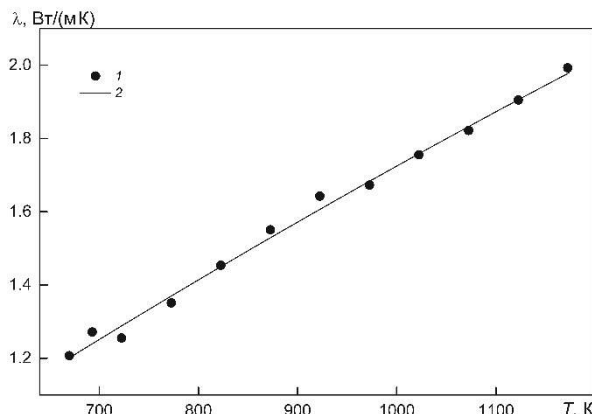


Рис. 1. Коэффициент теплопроводности жидкого сплава Cs-Bi (50 ат.% Bi). 1 – экспериментальные данные, 2 – аппроксимация (1).

Как видно по рис. 1, интерметаллический сплав имеет низкие значения теплопроводности, характерные для жидких солей [7]. Величина λ при 1000 К на порядок меньше значения λ_{id} для идеального раствора ($\lambda_{id} = 0,5\lambda_{Cs} + 0,5\lambda_{Bi}$), что подтверждает существующие представления об интерметаллических комплексах в расплавах цезий–висмут.

Список литературы:

- Meijer J.A., van der Lugt W. Resistivity of Liquid K–Bi and Cs–Bi Alloys// J. Phys.: Condens. Matter. 1989. Vol. 1. P. 9779–9784.
- Xu R., Kinderman R., van der Lugt W. Electrical Resistivities of Liquid Na–Bi and Rb–Bi Alloys// J. Phys.: Condens. Matter. 1991. Vol. 3. P. 127–133.
- Висмутиды / Г.В. Самсонов, М.Н. Абдусалымова, В.Б. Черногоренко. Киев: Наукова думка, 1977. 184 с.
- Леонова М.Е., Бдикин И.К., Гулиш О.К. и др. «Сильносжатое» состояние вещества в системе М–Bi// Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия. 2000. Т. 41. № 5. С. 334–337.
- van der Lugt W. Polyanions in Liquid Ionic Alloys: a Decade of Research// J. Phys.: Condens. Matter. 1996. V. 8. P. 6115–6138.
- Станкус С.В., Савченко И.В. Измерение коэффициентов переноса тепла жидких металлов методом лазерной вспышки// Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16. № 4. С. 625–632.
- An X.H. et al. Thermal conductivity of high temperature fluoride molten salt determined by laser flash technique// Int. J. Heat Mass Transf. 2015. Vol. 90. P. 872–877.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда
(проект № 16-19-10023)

ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Архипов В.А., Жарова И.К., Гольдин В.Д., Перфильева К.Г., Романдин В.И., Кузнецов В.Т.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36

Развитие современной высокотемпературной теплофизики связано со всесторонним исследованием новых перспективных теплозащитных материалов (ТЗМ), способных обеспечивать значительное увеличение рабочих температур, повышенную долговечность и экономичность изделий [1, 2]. При эксплуатации теплозащитных материалов в условиях высоких температур необходимо учитывать вклад лучистой составляющей в суммарный теплообмен. Для определения вклада излучения необходимо расширение базы данных по коэффициентам излучения поверхности материалов. Данные по интегральным коэффициентам излучения и их зависимости от температуры требуются для оценки пожароопасности объектов, расположенных вблизи нагретых при взрыве стенок трубопроводов и резервуаров, а также для организации мероприятий по подавлению очагов пожара.

В настоящей работе представлены результаты измерения коэффициента излучения поверхности теплозащитных материалов по новой методике, позволяющей повысить точность и оперативность измерений [3]. Методика основана на измерении температуры образца в процессе его остывания в вакуумированной камере и использовании аппарата обратных задач теплопроводности.

Для проведения измерений коэффициента излучения использовали экспериментальную установку, общий вид которой представлен на рис. 1. Установка работает следующим образом. На удерживающее устройство устанавливают цилиндрическую подложку с возможностью совмещения ее сквозного отверстия с керамической трубкой термопары. Затем на подложку размещают исследуемый образец таким образом, чтобы спай термопары коснулся дна канала отверстия в исследуемом образце. Отверстие для термопары выполнено так, чтобы спай находился в центре массы образца. После на всю сборку из подложки и образца закрепляют съемный нагреватель. Включают систему регистрации температуры и нагреватель. После запуска программы начинается процесс сбора данных по нагреву исследуемого образца. Период опроса данных с термопары заранее запрограммирован с частотой 1 раз в минуту. После достижения заданной температуры образца отключают нагреватель и убирают его с удерживающего устройства. Устанавливают стеклянный колпак на изолирующее основание и выравнивают его точно по центру прокладки. Для безопасности стеклянный колпак накрывают сетчатым колпаком. Затем производят вакуумирование камеры, а качество вакуума контролируют по показаниям вакуумметра. Проводят измерение температуры образца в процессе его остывания.

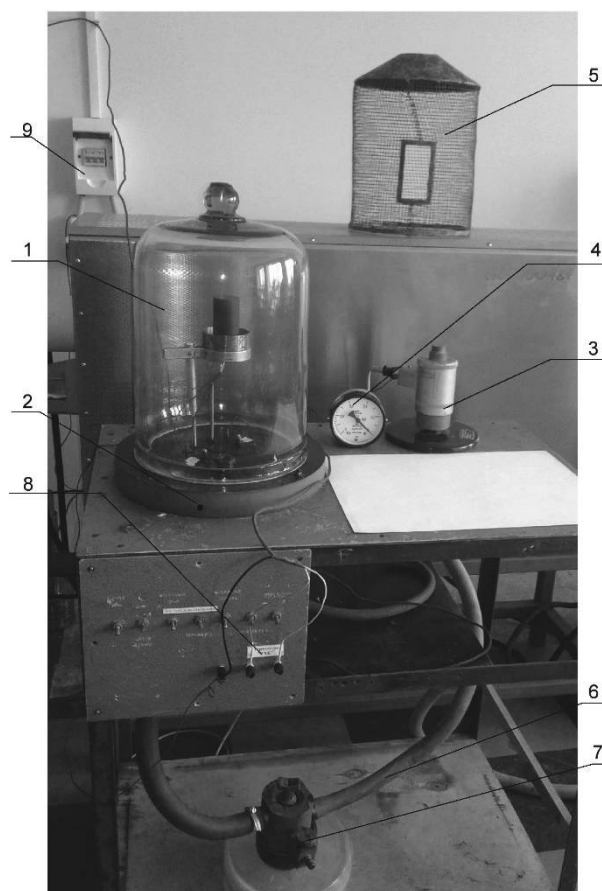


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки.

1 – вакуумная камера; 2 – изолирующее основание;
3 – нагреватель; 4 – вакуумметр; 5 – защитная сетка;
6 – вакуумные шланги; 7 – вакуумный кран; 8 – клеммы термопары; 9 – розетка подключения нагревателя.

Экспериментально получены графики зависимости температуры от времени в процессе остывания, с помощью которых определены интегральные коэффициенты излучения образцов ТЗМ.

Список литературы:

1. Тепловая защита / Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юревич. М.: Энергия, 1976. 390 с.
2. Теплообмен излучением: справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
3. Заявка на патент РФ № 2018126729 с приоритетом от 19.07.2018. Способ измерения интегрального коэффициента излучения поверхности твердого материала, МПК G01N 25/18, G01K 7/02 / В.А. Архипов, А.С. Жуков, И.К. Жарова, В.Д. Гольдин, К.Г. Перфильева, В.И. Романдин, Е.А. Маслов, В.Т. Кузнецов.

*Работа проведена при поддержке Программы
повышения конкурентоспособности ТГУ*

Барбин Н.М.^{1,2}, Дан В.П.¹, Терентьев Д.И.¹, Алексеев С.Г.³¹ Уральский институт ГПС МЧС России,
620062, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 22² Уральский государственный аграрный университет,
620075, Россия, Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, 42³ Независимый исследователь

Одной из отечественных программ, реализующих термодинамические расчеты, является программный комплекс TERRA, представляющий собой этап дальнейшего развития пакета программ АСТРА. Теоретические основы программного комплекса изложены в работе [1].

Расчеты состава фаз и характеристик равновесия проводятся с использованием справочной базы данных [2–5].

Рассчитаны теплофизические параметры системы C₃₂-Ag при давлении 10⁵ Па в температурном диапазоне 473...4273 К с применением программного комплекса TERRA.

Удельный объем системы C₃₂-Ag возрастает на всем рассматриваемом температурном интервале. В области температур 473 К – 4273 К – возрастает с 0,788 м³/кг до 9,736 м³/кг. При температурах 3673 К и 3973 К наблюдаются точки перегибов.

Полная энтальпия системы C₃₂-Ag в области температур 473...4273 К возрастает с 1087 кДж/кг до 8878, 870 кДж/кг. При 3673 К и 3973 К – появляются точки перегибов.

С 473 К по 4273 К энтропия системы C₃₂-Ag возрастает от 3,492 кДж/кг·К до 6,745 кДж/кг·К. При температурах 1873 К, 3673 К и 3973 К наблюдаются точки перегибов.

Полная внутренняя энергия системы C₃₂-Ag в температурном интервале от 473 К до 4273 К возрастает линейно с 695,902 кДж/кг по 7973,210 кДж/кг. При температурах 3673 К, 3973 К наблюдаются точки перегибов.

Молярная масса газовой фазы системы C₃₂-Ag в области температур 473 К – 2673 К остается неизменной и составляет 39,948 г/моль. В температурном интервале от 2673 К до 4273 К – уменьшается до 36,491 г/моль. При 3673 К и 3973 К – появляются точки перегибов.

Массовая доля конденсированной фазы системы C₃₂-Ag в температурном интервале от 473 К до 2673 К неизменна и составляет 0,200. В интервале температур от 2673 К до 3973 К – уменьшается; при достижении системой температуры 3973 К равна 0. При температуре 3673 К и 3873 К наблюдаются точки перегибов.

Удельная равновесная теплоемкость системы C₃₂-Ag в температурном интервале от 473 К до 3773 К возрастает с 0,660 кДж/кг·К до 16,688 кДж/кг·К. В интервале от 3773...3873 К значение параметра уменьшается до 2,427 кДж/кг·К. При повышении температуры с 3873 К до 4273 К удельная равновесная теплоемкость системы C₃₂-Ag возрастает линейно до 4,207 кДж/кг·К. При температурах 3673 К, 3773 К и 3873 К наблюдаются точки перегибов. До температуры 3973 К удельная равновесная теплоемкость системы C₃₂-Ag определяется теплоемкостью конденсированной фазы C_{32(к)}. С 3973 К удельная равновесная теплоемкость системы определяется паровой фазой.

Газовая постоянная системы C₃₂-Ag в области температур 473 К – 2673 К неизменна, составляет 208,130 Дж/кг·К. В интервале температур от 2673 К до 4273 К возрастает до 227,847 Дж/кг·К. При 3673 К и 3973 К – появляются точки перегибов.

Появление точек перегиба на графиках теплофизических характеристик при 3673 К и 3773 К объясняется снижением содержания конденсированного C₃₂ от 0,210 моль/кг до 0,001 моль/кг и возрастанием содержания газообразных C, C₂, C₃, C₄, C₅ от 0,160 моль/кг, 0,159 моль/кг, 1,122 моль/кг, 0,015 моль/кг и 0,067 моль/кг до 0,855 моль/кг, 0,824 моль/кг, 4,194 моль/кг, 0,071 моль/кг и 0,255 моль/кг соответственно; при 3873 К – обусловлено процессом молизации в паровой фазе; при 3973 К – линейным уменьшением содержания газообразных C₃, C₄, C₅ до 3,650 моль/кг, 0,054 моль/кг и 0,105 моль/кг.

Список литературы:

1. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 96 с.
2. Моисеев Г.К., Ватолин Н.А. Компьютерное моделирование образования различных конденсированных форм углерода // Журнал физической химии. 2002. Т. 76. №8. С. 1366–1370.
3. Моисеев Г.К., Ватолин Н.А. Оценка термодинамических свойств ряда конденсированных углеродных соединений // Журнал физической химии. 2002. Т. 76. №3. С. 424–428.
4. Моисеев Г.К., Ватолин Н.А. Термодинамические свойства некоторых газообразных фуллеренов // Журнал физической химии. 2002. Т. 76. №2. С. 217–220.
5. Моисеев Г.К., Ватолин Н.А. Оценка стандартной энтальпии образования (СЭО) метастабильных конденсированных «малых» самоассоциатов углерода и некоторых металлов // Доклады академии наук. 2003. Т. 392. №5. С. 653–656.

ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ОРИЕНТАЦИЙ ЗЕРЕН МЕДНОЙ ПОДЛОЖКИ НА РОСТ ГРАФЕНА

Костоград И.А.¹, Бойко Е.В.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Графен с уникальной двумерной гексагональной углеродной структурой является одним из наиболее перспективных материалов в различных областях материаловедения. Он обладает превосходной подвижностью носителей зарядов, теплопроводностью и оптической прозрачностью. Метод химического осаждения из паровой фазы (CVD) на медных подложках является наиболее перспективным для синтеза графена. В методе CVD, различные физические параметры, такие как скорость потока газа, структура подложки и термодинамические величины играют важную роль в процессах синтеза графена. Большое количество параметров позволяет производить очень тонкое управление процессом синтеза. Тем не менее, существует ряд трудностей, связанных со стадией роста графена. Графен, выращенный методом CVD, является поликристаллическим из-за наличия множества центров нуклеации на подложках Cu. Границы доменов в поликристаллическом графене могут оказывать негативное влияние на уникальные свойства графена. Динамика зарождения и роста графена играют решающую роль в определении качества конечной пленки.

Поверхность подложки содержит в себе множество особенностей, такие как шероховатость, дефекты, примеси, размер и ориентация кристаллов – все эти параметры могут оказывать сильное влияние на зарождении и рост графеновых доменов. Характер формирования центров зародышеобразования, скорость роста, а также однородность графена сильно зависит от кристаллографической структуры металлической подложки. При использовании поликристаллической меди в работе [1] наблюдался рост наиболее однородного графена с низким количеством дефектов на плоскостях Cu (111). Схожие результаты были получены группой Вуда и в работе [2] было показано, что бездефектный графеновый лист получается лишь в случае роста на семействе плоскостей Cu (111). Однако в другой работе [3] описывается противоположная картина: плоскости (100) были определены как более предпочтительные для роста графена, помимо этого, авторы показали, что качество графена контролируется активными центрами зародышеобразования, а не атомной структурой медной подложки. Подобные различия в результатах можно объяснить разными условиями CVD синтеза, такими как давление, концентрация газов и температура. Рост бездефектного графена на подложках Cu с различными кристаллографическими ориентациями в плоскости Cu (100) или Cu (111) до сих пор обсуждается в значительной степени. Например, в работе [4] проводились исследования влияния ориентации кристаллитов Cu: было продемонстрировано, что графен

формирует однородную гексагональную структуру на Cu (111) и, в то же время, линейную структуру на Cu (100).

Целью данной работы является выяснение механизма контролируемого роста, а также определение его различных параметров, такие как плотность зародышеобразования и скорость их роста на различных кристаллитах меди. Синтез графена проводился методом CVD на медной подложке, при температуре 1070°C, в протоке смеси газов Ar(95 sccm) + H₂(15 sccm) + CH₄(0.022 sccm), время синтеза 10 мин., по методике, описанной в [5]. Анализ полученных образцов проводился методами спектроскопии комбинационного рассеяния света, оптической и сканирующей электронной микроскопией, а также методикой дифракции отражённых электронов.

В работе проведено исследование влияния кристаллографических ориентаций зерен медной подложки на процессы разложения метана и роста графеновых слоев. Показано, что на зернах меди с различной кристаллической ориентацией скорость роста кристаллического зародыша и скорость формирования покрытия различны. Максимальные скорости формирования покрытия зафиксированы для плоскостей 110. Максимальный средний размер доменов графена и минимальная плотность зародышей графена в пленке наблюдаются для плоскости 100. Различия скоростей роста графенового покрытия объяснено различием кинетики разложения метана и скоростей диффузии на поверхностях с различной кристаллической ориентацией.

Список литературы:

1. Ogawa Y., Hu B., Orofeo C.M., Tsuji M., Ikeda K.-I., Mizuno S., Hibino H. and Ago H. Domain Structure and Boundary in Single-Layer Graphene Grown on Cu(111) and Cu(100) Films // J. Phys. Chem. Lett., 2012, 3, 219
2. Wood J.D., Schmucker S.W., Lyons A.S., Pop E. and Lyding J.W. Effects of Polycrystalline Cu Substrate on Graphene Growth by Chemical Vapor Deposition // Nano Lett., 2011, 11, 4547
3. Rasool H.I., Song E.B., Allen M.J., Wassei J.K., Kaner R.B., Wang K.L., Weiller B.H. and Gimzewski J.K. Continuity of graphene on polycrystalline copper // Nano Lett., 2010, 11, 251
4. Zhao L., Rim K., Zhou H., He R., Heinz T., Pinczuk A., Flynn G and Pasupathy A. Influence of copper crystal surface on the CVD growth of large area monolayer graphene // Solid State Commun. 151, 509 (2011).
Kostograd I.A., Trusov K.V., Smovzh D.V. Influence of Gas Mixture and Temperature on AP-CVD Synthesis of Graphene on Copper Foil // Advanced Materials Interfaces. 2016, vol. 3, №8, P. 1500823 (1–6).

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства образования и науки Российской
Федерации (Уникальный идентификатор прикладных
научных исследований (проекта) FMEF160417X0157)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕР-ГРАФЕНОВЫХ КОМПОЗИТОВ С НАНОЧАСТИЦАМИ ЗОЛОТА

Бойко Е.В.^{1,2}, Костоград И.А.¹, Смовж Д.В.^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Наноструктуры из благородных металлов (золото, серебро) широко используются при производстве различных фотонных устройств, позволяющих проводить измерения и контролировать электромагнитное излучение на наномасштабах [1,2]. Одним из примечательных свойств подобных наноструктур является феномен локализованного плазмонного резонанса. Совпадение частоты электромагнитного излучения с частотой колебания плазмонов, квазичастиц, отвечающих коллективным осцилляциям свободного электронного газа в металле, приводит к резкому увеличению поля на поверхности частицы и степени поглощения света. Данный феномен находит свое применение в биохимии [3], спектроскопии [4], а также в оптических устройствах, позволяющих преодолевать дифракционный предел [5]. Использование наночастиц благородных металлов с различными материалами может приводить к возникновению различных эффектов. Ярким примером подобных структур является система – наночастицы золота/графен.

Графен, двумерный углеродный материал с гексагональной кристаллической структурой, обладает превосходными свойствами [6], что делает его одним из самых перспективных материалов будущего, а его взаимодействие с неорганическими наночастицами (металл или полупроводник) позволяет создавать структуры с особыми свойствами [7, 8]. Получаемые композиты могут быть полезны при создании сенсоров, оптических и электронных устройств, в катализе, при производстве топливных элементов и т.д. В связи с этим возникает вопрос о взаимодействии наночастиц с графеновым слоем – исследование фундаментального механизма, лежащего в основе этого взаимодействия, позволит создавать эффективные системы графен-наночастицы с заданными свойствами.

В данной работе были исследованы параметры полимер-графеновых композитов с нанесенными на них методом лазерной абляции наночастицами золота. Графен был синтезирован на медной фольге AlfaAesar (Cu 99,8%, толщина 25 мкм) методом химического осаждения из газовой фазы при температуре 1070°C в смеси газов Ar/H₂/CH₄ при атмосфер-

ном давлении. Перенос графенового слоя осуществлялся механическим методом с помощью термического прессования (190°C) на полимер ПЭТ/ЭВА.

В полученных образцах, с помощью растрового электронного микроскопа, была исследована морфология поверхности наночастиц, а также получены спектры поглощения электромагнитного излучения в видимом диапазоне. Была исследована степень покрытия графена наночастицами золота при различных количествах лазерных импульсов и определена функция распределения частиц по размеру. Было показано, что наночастицы золота равномерно распределены по поверхности графена. Также были определены частоты плазмонного резонанса системы – наночастицы золота/графен.

Таким образом, полученные композиты графен/наночастицы Au можно использовать в качестве компонентов при производстве солнечных панелей, детекторов и прочих различных фотоэлектрических устройств.

Список литературы:

1. T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, P. A. Wolff // Nature. – 1998. – Vol. 391. – P. 667–669.
2. J. B. Pendry // Phys. Rev. Lett. – 2000. – Vol. 85. – P. 3966–3969.
3. S. Zeng. A review on functionalized gold nanoparticles for biosensing applications // Plasmonics. – 2011. – Vol. 6. – P. 491–506.
4. K. Kneipp, Y. Wang, H. Kneipp, L. T. Perelman, I. Itzkan, R. R. Dasari, M. S. Feld // Phys. Rev. Lett. – 1997. – Vol. 78. – P. 1667–1670.
5. W. L. Barnes, A. Dereux, T. W. Ebbesen // Nature. – 2003. – Vol. 424. – P. 824–830.
6. Cooper D. R. et al. Experimental Review of Graphene // ISRN Condensed Matter Physics. – 2012. – P. 501686.
7. Böer, K. W. // Survey of Semiconductor Physics. – 2nd. – John Wiley & Sons. – 2002. – Vol. 1. – P. 525.
8. Liu Xin, Swihart, M. T. Heavily-doped colloidal semiconductor and metal oxide nanocrystals: an emerging new class of plasmonic nanomaterials // Chem. Soc. Rev. – 2014. – Vol. 43. – P. 3908–3920.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства образования и науки РФ
(Уникальный идентификатор прикладных научных
исследований (проекта) RFMEFI60417X0157)*

Вендланд Л.Е.^{1,2}, Волков-Музылев В.В.¹, Демидов А.Н.³, Борисов Ю.А.^{1,4}¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва² Российский Университет Дружбы Народов, Москва³ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва⁴ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: vendlandl@gmail.com

Прогресс не стоит на месте и с каждым днем происходит усовершенствование технологий производства деталей. Одной из них является технологии 3D-печати или аддитивная технология, которая позволяет получать изделия из различных расходных материалов в кратчайшие сроки (PLA, ABS, PVA, Nylon, PC и др.).

Традиционные методы формирования деталей связаны с вытачиванием из массивной заготовки или литья/штамповки. Вытачивание детали связано с потерями большого количества материала, в том время как литье связано с удорожанием процесса изготовления. Аддитивные технологии предполагают изготовление цельных трехмерных объектов любой сложности с помощью различных видов 3D-технологий и полностью заменяют дорогие традиционные методы.

Одним из самых распространенных методов аддитивного производства является Fused Deposition Modeling (FDM). В данной технологии полимерная нить подводится к экструдеру, где расплавляется. С помощью расплавленной нити формируется физическая модель в соответствии с конфигурацией сечения виртуальной CAD-модели [1].

В настоящее время на рынке представлено большое количество различных полимеров для 3D-печати, но отсутствуют их прочностные характеристики в зависимости от формы заполнения (Infil Shapes) модели. Это приводит к тому, что необходимо проведение механических испытаний, которые позволят прогнозировать поведение ответственных изделий в условиях эксплуатации.

Объекты проводимых механических испытаний – специально напечатанные с помощью FDM метода образцы испытаний, специально изготовленные в соответствии с размерами, указанными в ГОСТ 11262–80 (Рисунок 1).

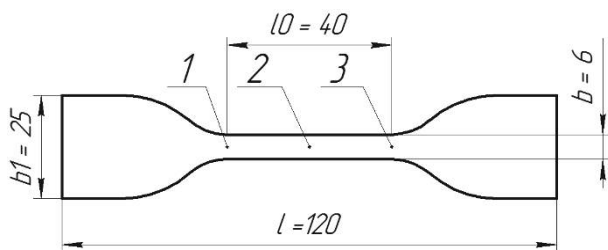


Рис. 1. Модель образца по ГОСТ 11262–80.

FDM метод позволяет печатать разными видами пластиков. Самыми известными пластиками на мировом рынке являются ABS и PLA. Для проведения механических испытаний выбран пластик PLA в чистом виде и компаунд на основе PLA – PLA HP.

Проведены механические испытания на электро-механической испытательной машине Instron 5982 2010 года выпуска. Испытания проведены при комнатной температуре. Регистрация параметров выполнялась с частотой опроса, равной 0,1 с.

Результатом механических испытаний является массив данных с параметрами – продольная растягивающая сила P и абсолютное удлинение рабочей части образца Δl . Для изучения свойств материала удобно использовать диаграммы, построенные в координатах «Напряжение – Относительная деформация» [2].

Результатами обработки массивов данных являются диаграммы растяжения исследуемых материалов, значения механических свойств материалов (условный предел текучести, коэффициент Пуассона, модуль Юнга).

Было произведено дополнительное исследование данных образцов с помощью микроскопа, в результате которого была выявлена нестабильность в адгезии пластика PLA.

На основании работы сделан вывод, что пластик PLA не предназначен для технологических работ, так как обладает плохими прочностными характеристиками, в отличие от своего компаунда – PLA HP.

Список литературы

1. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении. Пособие для инженеров. Москва, 2015. 218 с.
2. Дарков А.В., Шапиро Г.С. Сопротивление материалов – М. Высшая школа, 1975. 654 с.

СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ БИОМАССЫ

Ибраева К.Т., Табакаев Р.Б., Загорин А.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

С ростом населения и промышленного развития непрерывно растет спрос на энергию в мире. Такие темпы энергетического производства приводят к огромному количеству выбросов вредных веществ, что является причиной негативного воздействия на окружающую среду. В связи с этим в последние годы активизировались исследования в области поиска альтернативных источников энергии, известных как возобновляемые источники энергии (ВИЭ) [1]. Это связано с их широкой распространенностью, экологичностью использования и возможностью региональной энергетической независимости.

Одним из наиболее универсальных видов ВИЭ, с точки зрения энергетического использования, является биомасса. К тому же использование биомассы для выработки тепловой и электрической энергии является эффективным способом удаления биоотходов, которые занимают большие объемы, что, в свою очередь, приводит к периодическому возникновению природных пожаров [2]. В связи с этим вовлечение ресурсов биомассы в топливно-энергетический баланс является актуальным.

Однако биомасса характерна высокой влажностью, что приводит к низкому значению теплоты сгорания. Также низкая насыпная плотность, неоднородность фракционного состава, шлакозольные отложения являются причиной высоких эксплуатационных издержек энергетического использования биомассы в качестве топлива. В связи с изложенным повышение эффективности сжигания и переработки биомассы является актуальной задачей для исследований в настоящее время.

Одним из перспективных направлений по переработке органического сырья рассматривается пиролиз, в процессе которого образуются твердый углеродистый остаток, жидкие продукты (пиролизатическая вода и смола) и горючий газ. Необходимо отметить, что процесс пиролиза многостадийный и сложный, и наиболее распространенным методом его исследования остается физический эксперимент. Однако метод зависит от многих параметров, что делает процесс трудоемким.

В свою очередь, существует подход к изучению свойств угля, базирующийся на разделении его по фракциям в жидкостях с различной плотностью [3]. Данный способ позволяет разделить исходный материал на несколько проб с различным содержанием органической части и минеральных включений.

В работе исследовано несколько видов биомассы: отходы лесопромышленных (щепа различных пород древесины) и агропромышленных (отруби, солома) комплексов, торф (с 2 месторождений Томской области). Фракционирование по плотности осуществляли в лабораторной центрифуге Liston C2203 (Россия) при 2000 об./мин в течение 15 минут с отделением вначале более легких частиц (плотность 1400 кг/м³) и разделением оставшейся части на другие фракции.

Для исследования пиролиза фракций торфа проведен дифференциальный термический (ДТА) анализ на микротермоанализаторе STA 449C (Netzsch, Германия).

При обобщении результатов можно заметить, что пробы торфа имеют высокую зольность (более 22%), низкое значение теплоты сгорания (менее 7,6 МДж/кг). Теплота сгорания остальных проб биомассы, несмотря на малую зольность, не превышает 16–18 МДж/кг. Выход летучих веществ из биомассы имеет высокое значение, равное 69,7–83,4%, что говорит о высокой реакционной способности рассматриваемых топлив при сжигании, термической неустойчивости их органической массы. Нелетучий остаток, полученный после определения выхода летучих, имеет порошкообразный вид, у соломы и отрубей имеет склонность к спеканию. Оценивая результаты характерных температур плавления золы, можно отметить, что сухой торф достиг только $(t_d) t_A$, зола аркадьевского торфа и щепы не претерпевает изменений при температуре до 1480°C, температура начала деформации золы у соломы составила 1255°C. Химический анализ золы показал, что пробы торфа из-за высокого содержания CaO и SiO₂ в своем составе также имеют склонность к шлакованию при сжигании этих топлив. Температура начала деформации золы (t_d) у отрубей составила всего 780°C, что говорит о реальности расплавления легкоплавких компонентов с последующим шлакованием поверхностей нагрева.

Результаты дифференциального термического анализа фракции отрубей показывают, что в исследуемом диапазоне температур (до 1000°C) имеет место чередование экзотермических и эндотермических эффектов. Это свидетельствует о сочетании сравнительно тугоплавкой основы с легкоплавкими включениями.

Изученные характеристики показывают, что предпочтительным способом энергетического использования более высокозольного топлива является сжигание в кипящем слое. Для некоторых видов биомассы полученные характеристики показывают необходимость предварительной переработки биомассы для эффективного сжигания.

Список литературы:

1. Ермоленко Г.В. и др. Справочник по возобновляемой энергетике европейского союза. Институт энергетики НИУ ВШЭ, М.: 2016. 96 с.
2. Zaidel'man F. R. The problem of fire control on drained peatlands and its solution // Eurasian Soil Science, 2011. V. 44. – No. 8. P. 919–926.
3. Загорин А.С. Состав и термические свойства минеральной части бурых углей (теплотехнический аспект). Новосибирск: ИТ СО РАН, 1997. 187 с.

Работа поддержана РФФИ (грант № 18-38-00648)

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛОПАТОК ТУРБИН С ТЗП ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ГТД

Лепешкин А.Р.¹, Ильинская О.И.²

¹ ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»,
111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2

² Московский авиационный институт-Научно-исследовательский университет,
125993, Россия, Волоколамское шоссе, 4

Детали «горячего» тракта во многом определяют облик современных и перспективных газотурбинных двигателей (ГТД). Стремление к постоянному увеличению температуры газа перед турбиной (до 2000 К и более) обусловлено необходимостью повышения эффективности и экономичности двигателя.

Для обеспечения работоспособности высокоэффективных авиационных ГТД новых поколений необходимо создание новых жаропрочных материалов, а также улучшение защиты деталей высокотемпературного тракта ГТД с помощью теплозащитных (ТЗП) и жаростойких покрытий. Среди множества технологий нанесения покрытий лучшую теплозащиту при высоком сопротивлении термической усталости обеспечивает электронно-лучевой метод. С помощью указанного метода образуется керамическое покрытие кристаллитной (столбчатой) структуры на поверхности металлического подслоя (промежуточного жаростойкого покрытия) рабочей лопатки турбины ГТД. В работе на основе расчетного моделирования показано, что из-за сил от воздействия газового потока в столбчатом ТЗП появляются дополнительные напряжения.

Часто для исследования циклической долговечности различных ТЗП в процессе их разработки применяется радиационный разогрев металлических образцов с покрытиями при небольшой скорости 3°С/с [1] и в других работах (менее 20°С/с), что совершенно не соответствует реальным рабочим условиям деталей в эксплуатации. При таких малых скоростях нагрева термические напряжения в образце практически отсутствуют, а основным повреждающим фактором является окисление границы керамика/подслой, ведущее к сколу покрытия. Фактически эти испытания представляют собой испытания на жаростойкость. В реальных условиях скорость изменения температуры на поверхности детали составляет 100...200°С/с. При этом возникают значительные циклические упругопластические деформации основного материала, и из-за возникновения растягивающих напряжений ресурс эффективных ТЗП (например, на основе ZrO₂) резко падает по сравнению с результатами испытаний на циклическую жаростойкость, которые получаются при малой скорости изменения температуры.

В эксплуатации нагрев деталей «горячего» тракта осуществляется с поверхности газовым потоком, поэтому для получения достоверных результатов при испытаниях в лаборатории необходимо имитировать рабочие условия поверхностного нагрева изделий. Испытания в газодинамическом потоке дороги и длительны. Существенно дешевле и оперативнее использовать высокочастотный индукционный (ВЧ) нагрев [2, 3]. Расчетные исследования уточняют тепловое

состояние ТЗП на охлаждаемых лопатках и моделях при ВЧ нагреве. Исходными данными в проведенных расчетах являлись электрофизические, теплофизические свойства керамических покрытий и материала охлаждаемых деталей, характеристики стендовых режимов нагрева и охлаждения и параметры испытательного термоцикла. Расчеты с использованием метода конечных элементов в системе ANSYS позволили с учетом распределения теплового потока от индуктора между покрытием из диоксида циркония и металлом охлаждаемого изделия при частоте индукционного тока 440 кГц исследовать нестационарное тепловое состояние покрытия в зоне охлаждающего отверстия детали с учетом параметров испытательного термоцикла. В математическом моделировании теплового состояния керамических покрытий учитывалась специфика электрофизических свойств диоксида циркония. В частности, с ростом температуры диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь и электропроводность увеличиваются. Таким образом, при температурах 400–1000°С и выше диоксид циркония имеет полупроводниковые свойства. В целом керамическое покрытие в испытательном термоцикле нагревалось как за счет теплопередачи от металла детали, так и за счет индукционного и диэлектрического нагрева (внутреннего тепловыделения). Исследовались изменения термоциклической долговечности лопаток турбин с ТЗП на основе диоксида циркония после нанесения его по электронно-лучевой и плазменной технологиям. По разработанной методике были проведены термоциклические испытания и получены результаты исследований по термоциклической долговечности лопаток для перспективных ГТД (из жаропрочных никелевых сплавов) с керамическими покрытиями при их разогреве в ВЧ электромагнитном поле с частотой 440 Гц. Режим термоциклирования деталей осуществлялся в диапазоне $T_{min} \div T_{max} = 350 \div 1000^\circ\text{C}$ со скоростью 100÷150°С.

Список литературы:

1. Яковчук К.Ю. Теплопроводность и термоциклическая долговечность конденсационных термобарьерных покрытий // Электронно-лучевые процессы. 2014. №4. С. 25–31.
2. Лепешкин А.Р., Кувалдин А.Б. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях. Монография. М.: Инфра-М. серия: Научная мысль. 2019. 282 с.
3. Lepeshkin A.R., Feng Shi. Ceramic Coatings – Applications in Engineering. Intech. 2012. 320 p.
4. Lepeshkin A.R., Bychkov N.G., Ilinskaya O.I., Nazarov V.V. Investigations of thermal barrier coatings of turbine parts using gas flame heating // Journal of Physics: Conference Series. 2017. 899. 072002.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕНО-МЕДИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЗАСЫПКИ
ИНТЕРМЕТАЛЛИДА $\text{La}_{0.9}\text{Ce}_{0.1}\text{Ni}_5$ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ВОДОРОДОМ****Романов И.А., Борзенко В.И., Казаков А.Н.**Объединенный Институт Высоких Температур РАН,
125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

Улучшение теплообмена внутри металлгидридных систем хранения водорода является одной из актуальных задач на сегодняшний день. Для этого может быть использован целый ряд различных методик: улучшение теплопроводности металлгидридной засыпки, уменьшение радиуса засыпки, увеличение площади поверхности теплообмена, оптимизация рабочих параметров реакторов и др.[1]. Повышение теплопроводности за счет использования пеноматериалов из различных металлов в качестве матрицы активно исследуется в последние годы как экспериментально, так и с помощью различных методов математического моделирования [2, 3].

В данной работе исследовано влияние матрицы из пеномеди на распределение тепла внутри засыпки и РСТ-изотермы абсорбции и десорбции водорода интерметаллидом состава $\text{La}_{0.9}\text{Ce}_{0.1}\text{Ni}_5$ и проведено сравнение с результатами предыдущих исследований данного ИМС.

Образец для исследования приготавливался путем заполнения матрицы из пеномеди массой 8 грамм порошком активированного ИМС $\text{La}_{0.9}\text{Ce}_{0.1}\text{Ni}_5$ массой 50 г в сухом боксе с инертной атмосферой. Для изготовления матрицы из листа вспененной меди толщиной 2.3 мм вырезались диски, диаметр которых совпадал с внутренним диаметром рабочего автоклава и составил 45 мм. Поскольку по оси автоклава располагается трубка для термопары, которая не достает до дна автоклава, во всех дисках, кроме нижнего, были проделаны отверстия диаметром 6 мм. Всего матрица состояла из 4 слоев вспененной меди. Количество слоев подбиралось таким образом, чтобы объем пор был достаточным для заполнения порошком ИМС массой около 50 г. Чтобы в ходе заполнения матрицы и дальнейших экспериментов кольца вспененной меди не разошлись, и между ними не образовалось сплошного слоя ИМС, слои сшивались между собой тонкой медной проволокой. Размер пор вспененной меди больше размера частиц порошка активированного ИМС, то есть порошок просеивается через слой пеноматериала при длительной вибрации.

Полученные в результате экспериментов РСТ-изотермы абсорбции и десорбции водорода, а также данные о температуре внутри засыпки сравнивались с результатами предыдущих исследований образцов

данного ИМС массой 50 г с добавлением порошка меди и без каких-либо добавок.

Обнаружено, что водородсорбционные свойства образцов с добавками меди в форме порошка и пены заметно отличаются от свойств исходного ИМС. Наклон плато на РСТ-изотермах увеличился, а величины равновесного давления уменьшились, как и рассчитанные значения энтальпии и энтропии абсорбции водорода. При этом в образце с матрицей из пеномеди максимальное содержание водорода в металлгидриде было таким же, как и в чистом ИМС, в отличие от образца с порошком меди. Никаких агломераций частиц в образце с пеномедью после 10 циклов абсорбции-десорбции водорода обнаружено не было.

Оценка влияния добавок на распределение тепла в образцах производилась с помощью сравнения времени нагрева образца от комнатной температуры до температуры измерения РСТ-изотерм при откачанном до глубокого вакуума рабочем сосуде. Для этого использовались показания термопары, расположенной по оси рабочего сосуда в 2 мм от дна рабочего автоклава. Композит с порошком меди имеет минимальное время нагрева по сравнению с композитом с пеномедью и чистым сплавом: 30, 60 и 90 минут соответственно. Причина этого в том, что этот образец на 90% состоит из порошка меди, и в ходе циклирования самоуплотнился, что также повысило его теплопроводность.

Матрица из пеномеди улучшает распределение тепла в металлгидридных засыпках, при этом её масса составляет всего около 15% от массы образца. Таким образом, использование пеноматериалов в металлгидридных системах хранения водорода является перспективным.

Список литературы:

1. M. Afzal, R. Mane, P. Sharma Heat transfer techniques in metal hydride hydrogen storage: A review // *IJHE*, 42(2017), pp. 30661–30682.
2. F. Laurencelle, J. Goyette Simulation of heat transfer in a metal hydride reactor with aluminium foam // *IJHE*, 32 (2007), pp. 2957–2964.
3. S. Ferekh, G. Gwak, S. Kyoung, H. Kang, M. Chang, S. Yun, et al. Numerical comparison of heat-fin- and metal-foam-based hydrogen storage beds during hydrogen charging process // *IJHE*, 40 (2015), pp. 14540–14550.

Работа поддержана РНФ (грант № 17-79-20413)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАСТВОРОВ БОРНОЙ КИСЛОТЫ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АВАРИЙНОМУ ОХЛАЖДЕНИЮ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР

Сахипгареев А.Р., Морозов А.В.

АО «Государственный научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»,
249033, Россия, Обнинск, пл. Бондаренко, 1

В аварийной ситуации с разрывом главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) пассивные системы безопасности обеспечивают длительное (до 72 ч) охлаждение активной зоны реактора за счет подачи в нее раствора борной кислоты с концентрацией 16 г/кг из гидроемкостей первой, второй и третьей ступеней, а также поступления конденсата из парогенераторов, работающих в конденсационном режиме [1].

Длительность процесса, кипение теплоносителя и малое содержание борной кислоты в паровой фазе могут привести к её кристаллизации и осаждению в реакторе. Предельная концентрация раствора борной кислоты, соответствующая началу осаждения, зависит от температуры теплоносителя. При параметрах, соответствующих аварийному процессу с разрывом ГЦТ, предельная концентрация H_3BO_3 в активной зоне составляет ~450 г/кг H_2O .

Помимо этого, при возрастании кислотности среды увеличивается коррозионная активность раствора. При штатных режимах эксплуатации ВВЭР кислотность среды, обусловленная наличием в первом контуре реактора раствора борной кислоты с концентрацией 4–8 г/л, компенсируется введением в систему раствора гидроксида калия. Во время аварии с разрывом ГЦТ в активной зоне будет находиться только раствор борной кислоты с постепенно повышающейся концентрацией (за счет работы систем гидроемкостей) без каких-либо подщелачивающих реагентов. В настоящее время, известно о возможности образования боратов железа и никеля при достаточно низких концентрациях борной кислоты [2], соответственно, при многократном увеличении концентрации кислоты, риск образования данных соединений также возрастает. Бораты, образующиеся при коррозионном процессе, могут внести вклад в процесс образования отложений на элементах внутрикорпусных устройств, что, в дальнейшем, отразится на теплоотводе при аварийном процессе.

Поэтому знание теплофизических и физико-химических свойств борной кислоты является важным для расчета процессов накопления и кристаллизации борной кислоты. Известные данные о степени кислотности (рН) и плотности растворов борной кислоты охватывают ограниченный диапазон параметров (температура, давление, концентрация кислоты), не характерный для аварийной ситуации на АЭС с ВВЭР [3]. В связи с этим возникла необходимость проведения дополнительных опытов.

Экспериментальные исследования теплофизических и физико-химических свойств растворов борной кислоты проводились в два этапа. На первом этапе осуществлялось измерение теплофизических свойств – плотности растворов борной кислоты с

концентрацией 2,5–450 г/кг H_2O при температуре 25–130°C в диапазоне давления 0,1–0,4 МПа. Применялся пикнометрический метод. Измерения при параметрах среды, соответствующих аварийному режиму АЭС с ВВЭР выполнялись на специально созданной экспериментальной установке, в состав которой входят: бак подготовки раствора, металлические измерительные ячейки, система поддержания давления и система сбора данных.

На втором этапе исследований проводились опыты по определению рН водных растворов борной кислоты в зависимости от концентрации (5–100 г/кг H_2O) и температуры (25–50°C). Для измерения степени кислотности применялся рН-метр РН-98105, представляющий собой универсальный прибор для измерения кислотности в любых жидкостях. Получена зависимость рН водного раствора борной кислоты от температуры и её концентрации. На основе данных, полученных на первом этапе исследований, была уточнена формула расчета степени кислотности ортоборной кислоты.

В результате проведенных исследований были получены опытные данные по теплофизическим (плотность) и физико-химическим (рН) свойствам высококонцентрированных растворов борной кислоты при параметрах, характерных для аварийных режимов АЭС с ВВЭР. Полученные результаты позволяют существенно расширить диапазон известных параметров растворов борной кислоты. Экспериментальные данные по теплофизическим и физико-химическим свойствам водных растворов борной кислоты имеют важное прикладное значение для АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения, оснащенных системами пассивной безопасности. Они могут быть использованы для уточнения результатов расчетов аварийных процессов в реакторной установке, проводимых как с использованием одномерных расчетных программ, так и трёхмерных CFD-кодов.

Список литературы:

1. Лукьянов А.А., Зайцев А.А., Морозов А.В., Попова Т.В., Ремизов О.В., Цыганок А.А., Калякин Д.С. Расчетно-экспериментальное исследование влияния неконденсирующихся газов на работу модели парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме при запроектной аварии // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2010. № 4. С. 172–182.
2. Изучение высокотемпературных боратов / Некрасов И.Я., Григорьев А.П., Григорьева Т.А., и др. М.: Наука, 1970.
3. Азизов Н.Д., Ахундов Т.С. Термические свойства водных растворов борной кислоты при 298–573 К // Теплофизика высоких температур. 1996. Т. 34. Вып. 5. С. 798–802.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда (проект №16-19-10649)*

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА МОРФОЛОГИЮ МЕТАЛЛ-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ ФОРМИРУЮЩИХСЯ В ГРАФИТОВОЙ ДУГЕ

Смовж Д.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

При электродуговом распылении графитовых электродов с добавками различных элементов варьируя условия распыления можно изменять размер наночастиц и морфологию углеродной матрицы. Кроме того при отжиге синтезированных композитов в кислородсодержащей атмосфере возможно получать наночастицы оксида элемента добавки. Несмотря на обширную экспериментальную апробацию, существующие в современной литературе модели конденсации в графитовой дуге описывают главным образом процессы, протекающие с участием чистых углеродных материалов и конденсацию паров углерода на поверхности каталитической частицы. Развитие представлений о влиянии паров различных элементов на процессы конденсации в графитовой дуге может привести к развитию эффективных методов синтеза наночастиц с различной морфологией элементов добавки и углеродной матрицы. В настоящей работе на основе литературных данных и результатов экспериментальных исследований проведен анализ процессов происходящих при совместной конденсации различных металл-углеродных композитов имеющих близкие теплофизические свойства.

Синтез нанокompозитов Cu-C и Mn-C проведен в гелии при давлении 24 тора, при токе разряда 150 А, на установке для электродугового распыления. Смесь порошка элемента добавки с углеродом запрессовывалась в распыляемый электрод. Молярная доля элемента добавки в распыляемых электродах составляла 6,4%. Распыление производилось при постоянном напряжении, которое регулировалось скоростью подачи распыляемого электрода.

Исследования синтезированных материалов методами просвечивающей электронной микроскопии показало, что в большинстве случаев материал представляет собой наночастицы металла инкапсулированные в углеродные глобулы. Ранее в работах [1, 2] показано, что формирование структур отличных от объемных наночастиц характерно только для карбидов, образуемых алюминием и магнием. При их распылении и последующем удалении углерода при кальцинации формируются полые сферические оболочки. При этом размеры сферических оболочек формирующихся для магния и алюминия существенно различны, диаметр 20 и 200 нм, что связано с различной динамикой конденсации материалов, давление насыщенных паров для магния существенно выше. Таким образом, углеродный каркас, на который происходит осаждение, обогащенного металлом слоя, в случае магния вырастает до больших размеров. При конденсации паров углерода с кремнием формирование карбида кремния происходит при температурах 2800°C и ниже, согласно представлениям о конденсации углеродных паров в дуге, при данных температурах происходит формирование углеродных цепей и фуллереноподобных структур. Таким образом, рост

углеродных глобул (которые выступают в роли каркаса) начинается при температурах ниже 2800°C и происходит до температур конденсации магния 1090°C. В случае с магнием материал легко окислялся, и металлические сферы наблюдались в исходном композите до отжига на воздухе, следовательно, конденсация магния происходила на конечном этапе формирования композита и весь металл располагается на поверхности углеродного материала. В указанном диапазоне температур 2800 – 1000°C, так же происходит конденсация паров других металлов, таких как железо, никель, медь и марганец. Наиболее низкой температурой, соответствующей насыщению обладают медь и марганец. Тем не менее, во всех упомянутых случаях происходит конденсация наночастиц без внутренних полостей, размеры которых существенно ниже, при этом частицы металла часто расположены в геометрическом центре сажевой глобулы.

Данный эффект объяснен предположением о подвижности наночастиц в пределах сажевой глобулы до момента фазового перехода жидкость – твердое тело, который для наночастиц происходит при температурах существенно ниже, чем для объемного материала. Диффузия атомов металла внутри сажевой глобулы может приводить к формированию наночастиц в центре сажевой глобулы. Данный эффект должен быть наиболее выраженным для металлов не формирующих химических связей с углеродом (карбидов) и формирующих металлоподобные карбиды с внедрением углерода в решетку металла. В случае с солеобразными и ковалентными карбидами наличие химической связи с углеродной матрицей должно снижать подвижность элемента добавки. Таким образом, размер и форма наночастиц определяется типом формирующегося карбида и подвижностью компоненты добавки в сажевой глобуле. Согласно высказанному предположению морфологических особенностей можно ожидать в случае распыления композитов с элементами формирующими солеобразные карбиды (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr, Be, Ca, Sr, Ba, Ra, Sc, Y, La) и ковалентные (B).

Список литературы

1. Dmitry V. Smovzh, Salavat Z. Sakhapov, Alexey V. Zaikovskii, Sergey A. Novopashin. "Morphology of aluminium oxide nanostructures after calcination of arc discharge Al-C soot" // *Ceramics International*. – 2015, – 41, – P. 8814–8819.
2. Dmitry V. Smovzh, Salavat Z. Sakhapov, Alexey V. Zaikovskii, Svetlana A. Chernova, Sergey A. Novopashin. Formation mechanism of MgO hollow nanospheres via calcination of C-MgO composite produced by electric arc spraying. *Ceramics International*, 2019, V.45, Iss.6, P. 7338–7343.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского
научного фонда (проект № 18-19-00213)*

КАЛОРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭКВИАТОМНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ РУБИДИЙ – ВИСМУТ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 293–1175 К

Станкус С.В., Савченко И.В., Яцук О.С.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Расплавы системы цезий – висмут проявляют аномальные свойства, что связывают с возникновением ионных связей между атомами металлов [1–2]. Такое предположение базируется на значительной разнице в электроотрицательности компонентов. Следует, однако, отметить, что теория этого явления разработана недостаточно полно. Не определен круг систем, в которых наблюдается концентрационный переход «металл-неметалл», не до конца ясно, как он связан со свойствами компонентов и видом фазовой диаграммы. В первую очередь это обусловлено отсутствием подробных и надежных экспериментальных данных по многим физико-химическим и, в частности, калорическим свойствам жидких сплавов, в которых проявляется ионный характер межатомного взаимодействия. Задачей настоящей работы являлось получение экспериментальных данных по энтальпии и теплоемкости эквипотенциального сплава системы цезий-висмут в широком интервале температур твердого и жидкого состояний.

Исследования калорических свойств проведены методом смешения на массивном изотермическом калориметре [3]. Образец сплава $Rb_{50}Bi_{50}$ приготавливался из компонентов чистотой 99.9 мас.% (Rb) и 99.98 мас.% (Bi). Концентрация компонентов определялась весовым методом. Молекулярная масса сплава составила 147.200 г/моль. Все операции с образцом, включая герметизацию ампулы из стали 12X18H10T дуговой сваркой, проводились в боксе с защитной атмосферой (Ar, 99.992 об.%).

Результаты измерений инкремента энтальпии приведены в табл. 1. Температура кристаллизации сплава составила $T_L = 643.9 \text{ K} \pm 1.5 \text{ K}$. Расплав достаточно сильно (до 20 К) переохлаждался. Это дало возможность получить данные по энтальпии расплава при температуре (629.6 К) ниже T_L . Заметим, что переход в метастабильное состояние не привел к изменению характера зависимости $H_{298}(T)$.

Таблица 1. Энтальпии сплава $Rb_{50}Bi_{50}$

$T, \text{ K}$	$H_{298}, \text{ Дж/моль}$	$T, \text{ K}$	$H_{298}, \text{ Дж/моль}$
432.6	3651	728.3	21616
456.6	4293	827.5	25518
481.2	4952	877.1	27383
506.0	5609	926.7	29338
555.3	6995	976.5	31324
580.1	7677	1026.6	33183
604.7	8365	1076.5	35163
629.6	17686	1126.1	36983
654.2	18712	1176.8	38984
678.8	19709	-	-

Обработка первичных данных показала, что энтальпия $Rb_{50}Bi_{50}$ как в твердом, так и в жидком со-

стоянии квадратично зависит от температуры. Среднее абсолютное отклонение точек от аппроксимирующих уравнений составило 10 и 30 Дж/моль, соответственно. Определенный по сглаженным значениям скачок энтальпии при плавлении составил:

$$\Delta H_f = 8844 \pm 60 \text{ Дж/моль}.$$

Используя полученные результаты разработаны справочные таблицы калорических свойств сплавов для интервала температур 293.15–1175 К.

На рис. 1 приведены относительные отклонения экспериментальных значений энтальпии и теплоемкости сплава $Rb_{50}Bi_{50}$ в жидком состоянии от их аддитивных значений. Видно, что отклонение теплоемкости уменьшается с ростом температуры, что может быть объяснено распадом комплексов с частично ионным характером межатомного взаимодействия.

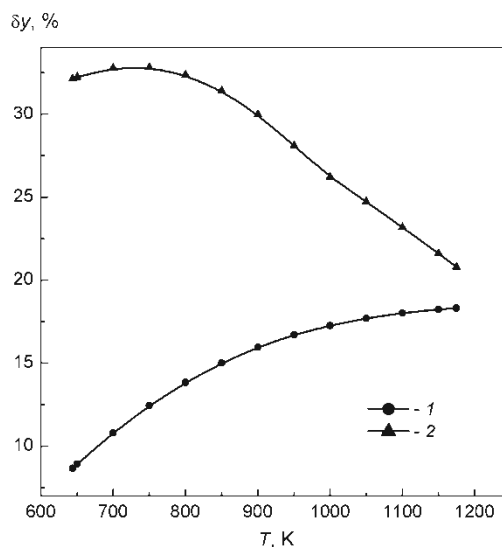


Рис. 1. Относительное отклонение измеренных значений калорических свойств расплава $Rb_{50}Bi_{50}$ от расчетов по правилу аддитивности.

$$y = H_{298} (1) \text{ или } C_p (2); \delta y = [y_{\text{exp}}/y_{\text{add}} - 1] \times 100\%.$$

Список литературы:

1. Liu M., Li C., Du Z., Guo C., Niu C., Thermodynamic assessment of the Bi–Rb binary system. *Thermochim. Acta*. 2013. Vol. 551. P. 27.
2. Stankus S.V., Abdullaev R.N., Khairulin R.A. Density of rubidium–bismuth melts // *High Temperatures – High Pressures*. 2018. Vol. 47. P. 403–415.
3. Станкус С.В., Савченко И.В., Яцук О.С. Высокотемпературный калориметр смешения для исследования веществ и материалов в твердом и жидком состояниях // *Приборы и техника эксперимента* // 2017. № 4. С. 150–156.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10023)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В ВОДОРОДОСЖИГАЮЩИХ УСТАНОВКАХ

Счастливцев А.И., Дуников Д.О., Борзенко В.И.

ОИВТ РАН,

125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2

Экспериментальное исследование теплофизических свойств продуктов сгорания в водородосжигающих установках важно для обеспечения их надежной и эффективной работы. Для водородно-кислородных парогенераторов эта проблема особенно актуальна в связи с тем, что при стехиометрическом сгорании водорода в кислороде и давлении до 7 МПа температура в камере сгорания может достигать 3600 К, а тепловые потоки 15 МВт/м², при этом расход охлаждающей воды должен быть минимальным, поскольку она подается внутрь конструкции и понижает температуру генерируемого пара.

Исходя из опыта ракетостроения, для обеспечения вышеприведенных условий в камере сгорания использовалось комплексное охлаждение, включающее в себя внешнее охлаждение огневой стенки и внутреннее пристеночное струями воды, благодаря чему надежное охлаждение при тепловой мощности 25 МВт удается обеспечивать расходом воды 2.7–2.8 кг/с, при суммарном 4.2–4.8 кг/с [1, 2], при этом расходы охлаждающей воды и тепловая мощность H_2/O_2 – парогенератора имеют нелинейную зависимость, что требует создания соответствующей системы управления.

Для экспериментального исследования теплофизических свойств продуктов сгорания в водородосжигающих установках разработан и создан экспериментальный стенд, который позволяет проводить испытания установок мощностью до 200 кВт.

Разработаны методики экспериментальных исследований для определения коэффициента излучения водородно-кислородной смеси при температурах до 4000 К и давлении до 8 МПа с различным соотношением компонентов водорода и кислорода. Использование специальных охлаждающих вставок позволяет проводить отбор продуктов сгорания практически на любом протяжении камеры сгорания.

Для предотвращения рекомбинации водорода и кислорода после осуществления отбора разработана методика, позволяющая минимизировать эти влияния. Она основана на том, что при резком охлаждении и разбавлении продуктов сгорания инертным газом [3, 4].

Для определения тепловых потоков в камере сгорания водородосжигающих устройств разработана многосекционная камера сгорания, позволяющая осуществлять измерение теплового потока в каждой секции в зависимости от режима работы и типа смешительного элемента. Это важно, для определения зон локального перегрева, которые могут изменяться в зависимости от целей использования водородосжигающего устройства.

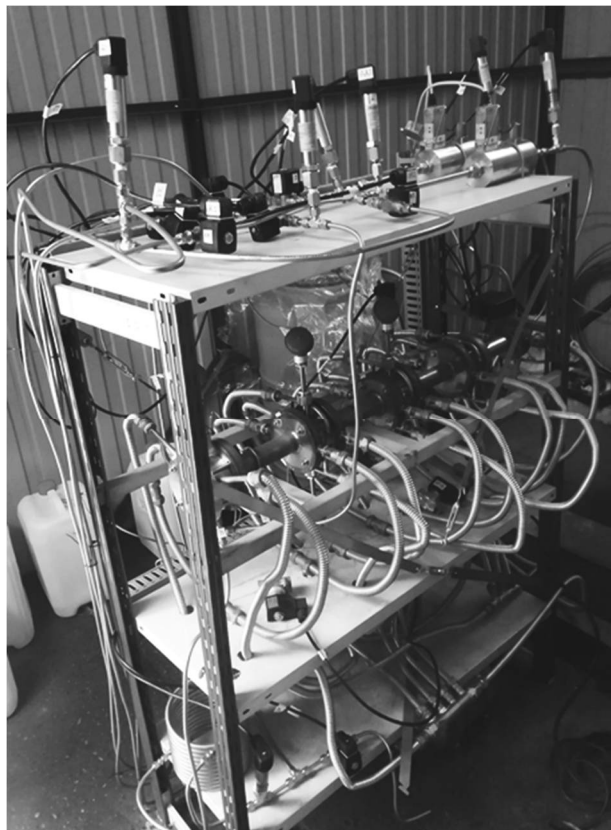


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда для испытания водородосжигающих установок мощностью до 200 кВт.

Список литературы:

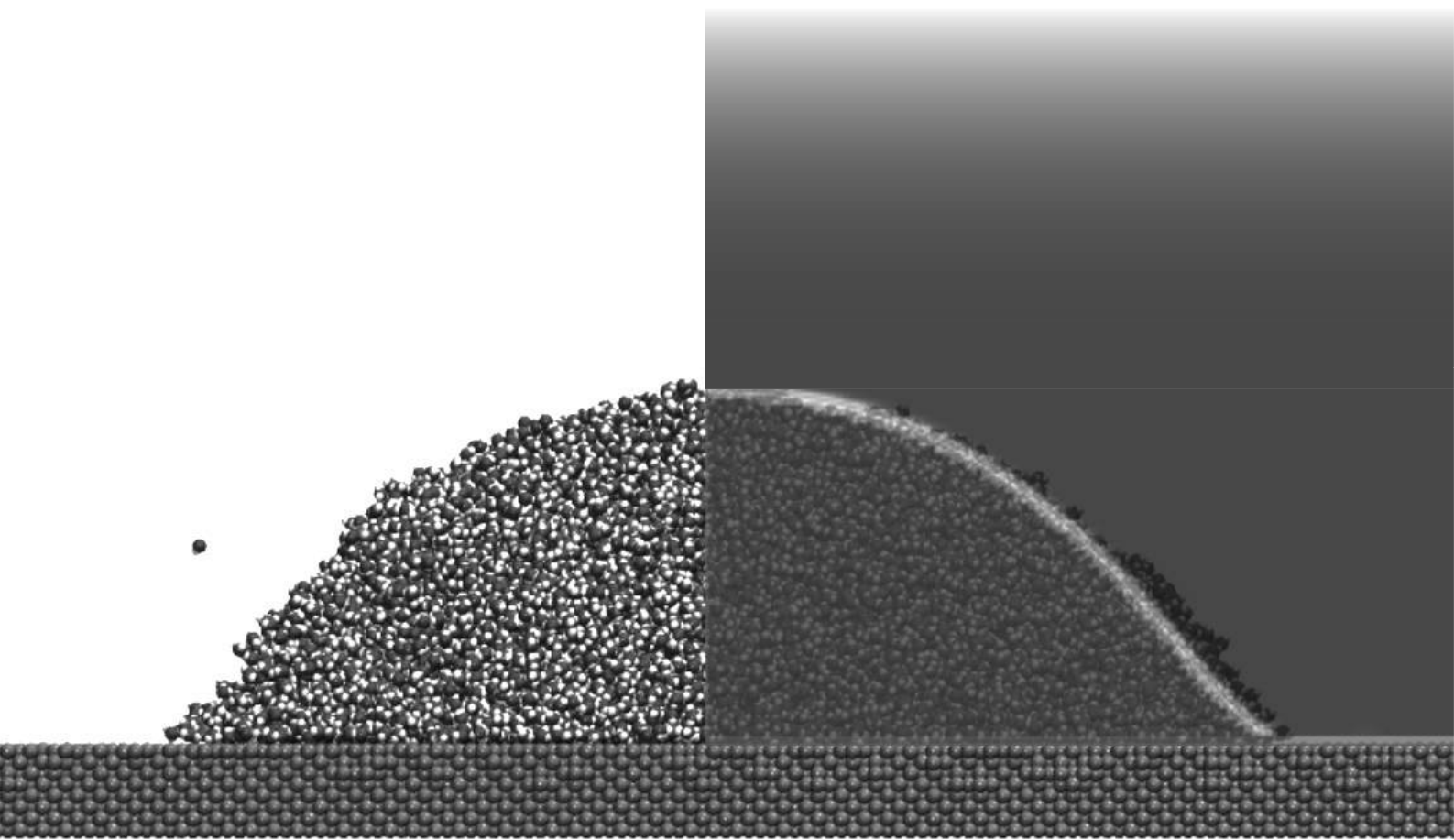
1. Malyshenko S.P., Prigozhin V.I., Savich A.R., Schastlivtsev A.I., Il'ichev V.A., Nazarova O.V. Effectiveness of steam generation in oxyhydrogen steam generators of the megawatt power class // High Temperature. 2012. Т. 50. № 6. – С. 765–773.
2. Aminov R.Z., Schastlivtsev A.I., Bairamov A.N. On the issue of investigating the kinetics of processes in dissociated water steam // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Т. 42. № 32. – С. 20843–20848.
3. Blair L.S., Getzinger R.W. A shock tube study of recombination in the hydrogen-oxygen reaction using infrared emission from water vapor // Combustion and Flame. 1970. Т. 14. № 1. – С. 5–12.
4. Getzinger R.W., Blair L.S. Recombination in the hydrogen-oxygen reaction: A shock tube study with nitrogen and water vapour as third bodies // Combustion and Flame. 1969. Т. 13. № 3. – С. 271–284.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (субсидия #14.607.21.0188 RFMEFI60717X0188)



СЕКЦИЯ 8

Тепломассообмен и гидродинамика на микро- и наномасштабах



ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ И ДИНАМИКИ КАПЕЛЬ ЭМУЛЬСИИ В МИКРОСТРУКТУРАХ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Абрамова О.А., Гимадеев А.В., Питюк Ю.А., Искандаров А.И.

Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем, Башкирский государственный университет
450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32А

Новейшие разработки в микроэлектронике, генной инженерии, производстве микромеханических устройств привели к созданию научного направления, называемого «микрогидродинамика», нацеленного на изучение поведения жидких систем в микро-скопических масштабах (от 1 мкм до 100 мкм). Применяемые в настоящее время подходы к численному моделированию движения деформируемых капель в объеме жидкости в большинстве своем имеют ряд ограничений, связанных с количеством изучаемых объектов, скоростью проведения расчетов, а также с геометрией рассматриваемых областей. Задачи большой вычислительной сложности возникают, когда для описания динамики системы требуется малый шаг по времени и большое количество дискретных элементов. Поэтому разработка и применение эффективных подходов к трёхмерному моделированию таких процессов является крайне важным.

Настоящая работа посвящена численному моделированию динамики деформируемых капель эмульсии в объёме вязкой жидкости вокруг неподвижных недеформируемых микроструктур различной конфигурации, а также изучению гидродинамических потоков в соответствующих областях. Рассматриваются течения при малых числах Рейнольдса и умеренных числах Струхала.

Основной особенностью численного подхода, используемого в рамках данного исследования, является применение метода граничных элементов [5] для трехмерных задач, ускорение которого произведено как за счет высокоэффективного масштабируемого алгоритма (быстрый метод мультиполей), так и за счет использования гетерогенных вычислительных архитектур (многоядерные CPU и графические процессоры GPU). В предыдущих работах авторов [1–4] подробно описан разработанный подход, реализованные алгоритмы и их применение к прямому решению систем, содержащих до 6 миллионов неизвестных, трехмерному моделированию стоковых течений десятков тысяч капель и пузырьков в неограниченной области, а также нескольких дисперсных включений в микроканалах круглого поперечного сечения.

Были проведены расчеты по обтеканию структур, образованных цилиндрическими элементами, ограниченными с четырёх сторон плоскостями, для различного взаимного расположения элементов. Полученные картины течений были сопоставлены с результатами лабораторных экспериментов, проводимых в рамках Центра микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем.

Кроме того, изучалась динамика капель эмульсии при течении вязкой жидкости вокруг неподвижных микроструктур различной конфигурации. Варьировались соотношение вязкостей, размеры и расположение капель (см. рис. 1). Показано, что при приближе-

нии к структурам капли претерпевают значительные деформации, которые могут приводить к разрывам и дроблению дисперсных включений, но в данной постановке задачи изменение топологии рассматриваемых объектов пока что не реализовано, что является одним из приоритетных направлений дальнейшего развития модулей.

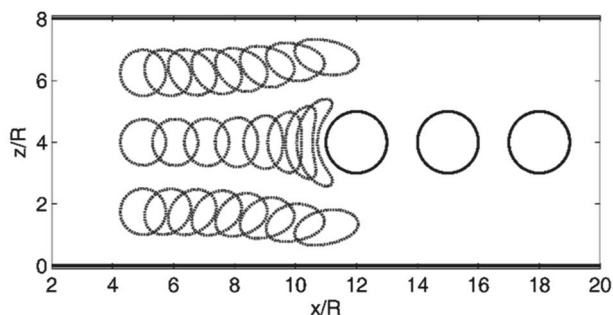


Рис. 1. Динамика трех дисперсных включений при обтекании фиксированных недеформируемых структур с одинарной пористостью в различные моменты времени.

Реализованный подход может быть использован для исследования гидродинамических потоков в различных областях сложной геометрии, а также для более детального изучения особенностей динамики деформируемых дисперсных включений в объеме вязкой жидкости в микроструктурах.

Список литературы:

1. Pityuk Yu.A., Abramova O.A., Fatkullina N.B., Bulatova A.Z. BEM Based Numerical Approach for the Study of the Dispersed Systems Rheological Properties // Studies in Systems, Decision and Control. – 2018. – V 15, pp. 338–352.
2. Abramova, O.A., Akhatov, I.S., Gumerov, N.A., Pityuk, Y.A., Sametov, S.P. Numerical and Experimental Study of Bubble Dynamics in Contact with a Solid Surface // Fluid Dynamics. – 2018. – V. 53(3), pp. 337–346.
3. Zarafutdinov I.A., Pityuk Y.A., Gainetdinov A.R., Gumerov N.A., Abramova O.A., Akhatov I.S. GPU acceleration of bubble-particle dynamics simulation // Communications in Computer and Information Science. – 2018. – V. 910, pp. 235–250.
4. Abramova, O.A., Pityuk, Yu.A., Gumerov, N.A., Akhatov, I.Sh. High performance BEM simulation of 3D emulsion flow // Communications in Computer and Information Science (CCIS). – 2017. – Vol 753. pp. 317–330.
5. Pozrikidis C. Boundary Integral and Singularity Methods for Linearized Viscous Flow. – 1992 (Cambridge University Press, Cambridge, MA).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-20102 (часть, посвященная экспериментальному и численному изучению течения вязкой жидкости) и при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-549.2019.1. (часть работы, посвященная моделированию динамики капель в микроструктурах)

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ЧАСТИ УРАВНЕНИЯ БОЛЬЦМАНА

Анисимова И.В., Игнатьев А.В.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ
420111, Россия, Казань, ул. Карла Маркса, 10

Проблема определения коэффициентов переноса вязкости, диффузии, теплопроводности и др. в макроуравнениях аэрогидромеханики является актуальной и привлекает внимание большого круга ученых [1–4]. Как правило, в настоящее время определение осуществляется экспериментальным способом или на основе кинетической теории газов – уравнения Больцмана [5]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + c \cdot \nabla_r f + F \cdot \nabla_c f = \iiint (ff'_1 - ff_1) g b db d\epsilon d^3 c_1$$

Правая часть уравнения, состоящая из кратных несобственных интегралов, описывает диссипативные процессы в газах и используется в алгоритме определения значений переносных характеристик среды. На основе метода Чепмена-Энскога, полиномов Сонина, интегральных скобок данные кратные интегралы преобразуются в выражения, состоящие из линейных комбинаций трехкратных несобственных интегралов, которые называются интегралами столкновения $\Omega^{(l,r)}$:

$$\Omega^{(l,r)} = \left(\frac{kT}{\pi m} \right)^{\frac{1}{2}} \int_0^\infty \exp(-\gamma^2) \gamma^{2r+3} Q^{(l)} d\gamma. \quad (1)$$

Здесь γ – безразмерная переменная интегрирования, связанная с относительной скоростью молекул:

$$\gamma = \left(\frac{m_{ij}}{2kT} \right)^{\frac{1}{2}} g^*$$

$Q^{(l)}$ – средние сечения рассеяния молекул:

$$Q^{(l)} \equiv Q^{(l)}(g^*) = 2\pi \int_0^\infty (1 - \cos^l \chi(b^*, g^*)) b^* db^*. \quad (2)$$

$\chi(b^*, g^*)$ – функция угла рассеяния молекул:

$$\chi(b^*, g^*) = \pi - 2b^* \int_{(r_0^*)_{\min}}^\infty \frac{dr^*/r^{*2}}{\sqrt{1 - \Phi_{eff}^*/g^{*2}}}. \quad (3)$$

Алгоритм вычисления их значений состоит из нескольких процедур. Сначала определяются значения функции угла рассеяния взаимодействующих молекул (3), описывающей отклонение направления их движения от первоначального. Выражение для функции угла рассеяния содержит несобственный интеграл, у которого значение нижнего предела находится из решения нелинейного алгебраического уравнения. Для определения значения нижнего предела интегрирования авторы предлагают как асимптотические, так и численные алгоритмы. Так как значения функции угла рассеяния используются в комбинации трехкратных несобственных интегралов, то проведен качественный анализ её равномерной сходимости. Показано, что значения функции угла рассеяния

определяются на множестве действительных чисел R в случае невозвратных траекторий взаимодействующих молекул, а в случае возвратных траекторий – на множестве комплексных чисел C . Получено уравнение поверхности, в точках которой происходит бифуркация траекторий.

Для определения значений среднего сечения рассеяния взаимодействующих молекул (2), которое выражается посредством второго несобственного интеграла в столкновительной части уравнения Больцмана, предложены эффективные квадратурные формулы. Поскольку данный несобственный интеграл содержит осциллирующую подынтегральную функцию, зависящую от параметра, то для определения его значений рекомендовано использовать модификацию квадратуры Гаусса-Кристоффеля.

Для вычисления значений третьего несобственного интеграла, входящего в столкновительную часть уравнения Больцмана, – интеграла столкновения молекул $\Omega^{(l,r)}$ (1), предложены вычислительные технологии, основанные на кубатурах Гаусса-Кристоффеля и теории сплайнов. Данные технологии позволяют получить аналитический вид подынтегральной функции в несобственном интеграле и использовать квадратурные формулы для его вычисления.

Для некоторых газовых сред был проведен сравнительный анализ расчетных значений коэффициентов переноса, полученных с помощью вычислительных технологий авторов данной работы, с имеющимися экспериментальными данными [6–7]. Качественный анализ и сопоставление с данными других авторов позволяет утверждать о корректности результатов, полученных по предлагаемым вычислительным технологиям.

Список литературы:

1. Теоретическая гидромеханика ньютоновских сред/ Липанов А.М. М.: Наука, 2011. 550 с.
2. Fomin V.M., Postnikov B.V. and Lomanovich K.A. Effect of the electric discharge on nonstationary processes during supersonic air and methane jet flow over a flat obstacle// Teplofizika Vysokikh Temperatur. 2011, vol. 49, No. 5, pp. 658–662.
3. Численное моделирование течений в турбомашинах. Черный С.Г., Чирков Д.В., Лапин В.Н., Скороспелов В.А., Шаров С.В. Новосибирск: Наука, 2006. 202 с.
4. V.O. Podryga, S.V. Polyakov. Supercomputer multiscale modeling of gas mixture flows in microchannels// Computational Methods and Modelling. 2018, 19:1, pp. 38–50.
5. Математическая теория процессов переноса в газах / Дж.Ферцигер, Г.Капер; под ред. Д.Н.Зубарева и А.Г. Башкирова. М: Мир, 1976. 554 с.
6. Вычислительные технологии процессов переноса газов / Анисимова И.В., Игнатьев В.Н. Казань: КНИТУ-КАИ, 2013. 236 с.
7. Anisimova I.V., Ignat'ev V.N. Modeling intermolecular interaction in multicomponent environments in energy power systems // IEEE Xplore/2018 International multi-conference on industrial engineering and modern technologies «Far East Con-2018». <https://ieeexplore.ieee.org/document/8602742>.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ НАТЕКАНИИ СВЕРХЗВУКОВОЙ МИКРОСТРУИ НА НАГРЕВАЕМУЮ ПОВЕРХНОСТЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЛЮОРЕСЦИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

Анискин В.М.¹, Маслов Н.А.^{1,2}, Цибульская Е.О.^{1,2}, Коротаева Т.А.¹

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. А.А. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Глобальная миниатюризация приборов в различных областях техники, стремительное развитие микроэлектромеханических систем вызывает большой интерес к исследованиям микропотоков жидкости и газа. Ключевой особенностью этих трехмерных мини- и микрообъектов является то, что характерными размерами их элементов являются миллиметры или микроны. Тенденция к миниатюризации последних двух десятилетий приводит к интенсивному развитию теплообменных систем с мини- и микро-размерами. Использование микроструй является одним из возможных решений проблемы локального охлаждения.

В данной работе рассматривалось истечение сверхзвуковых недорасширенных мини- и микро-струй на нагреваемую поверхность. Эксперименты выполнены с использованием термочувствительного флуоресцирующего покрытия. В качестве люминофора использовался родамин Б. Сам по себе родамин хорошо окрашивает практически любую поверхность, однако при высыхании, как правило, практически перестаёт люминесцировать. Но если его смешать с буферной средой, формирующей устойчивое оптически прозрачное покрытие после высыхания, то флуоресцирующие свойства родамина сохраняются. Для создания флуоресцирующего покрытия в качестве буферной среды использовался полиуретановый лак. При смешивании с полиуретановым лаком, получающееся покрытие способно под воздействием возбуждающего излучения сильно флуоресцировать с максимумом интенсивности на длине волны 600 нм.

В качестве нагреваемой пластины использовалась нержавеющая фольга толщиной 15 мкм (рис.1). Сверху фольга покрывалась термочувствительным флуоресцирующим слоем. Толщина слоя составляла порядка 50 мкм. Снизу фольга теплоизолировалась с помощью аэрогеля – вещества с самой низкой теплопроводностью (0,017 Вт/(мК)). К фольге были припаяны два токоподводящих контакта. Также к поверхности фольги приклеивалась термопара для фиксации температуры поверхности. Для возбуждения флуоресценции использовался неколлимированный пучок от синего светодиода (спектральная полоса излучения 450- 470 нм) мощностью 3 Вт с расстояния в 5 см. При этом интенсивность флуоресценции снижается с ростом температуры поверхности.

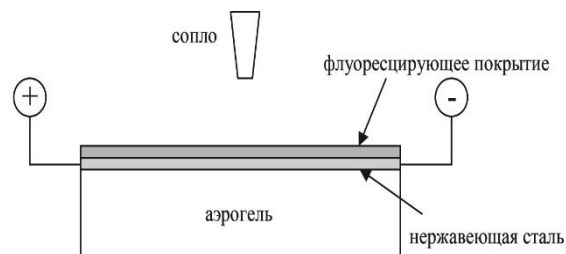


Рис.1. Схема эксперимента.

Тестовые эксперименты позволили определить зависимость интенсивности флуоресценции покрытия от температуры и концентрации родамина в лаке.

В экспериментах использовались осесимметричные сопла диаметром 1 мм и 300мкм. Нерасчетность струй менялась в диапазоне 1,1–4. Диапазон расстояний от сопла до пластины составлял 2–15 калибров сопла.

На рис.2 в качестве примера приведено распределение температуры поверхности пластины при натекании на нее сверхзвуковой микроструи (диаметр сопла 300 мкм, нерасчетность струи 3, расстояние между пластиной и соплом составляет 0,9 мм).

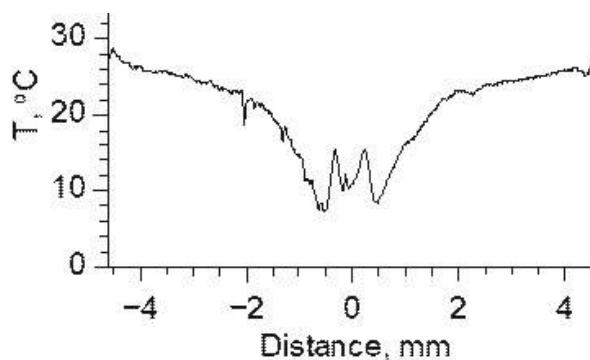


Рис.2. Распределение температуры поверхности нагреваемой пластины.

Определены коэффициенты теплоотдачи при натекании сврхзвуковых мини- и микроструй на нагреваемую поверхность при нерасчетности струй от 1,1–4 при различных расстояниях между соплом и поверхностью.

ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИСПАРЕНИЯ И КИПЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Бабенко Д.Д., Дмитриев А.С., Михайлова И.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва
111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., 14

Функциональные наноматериалы в последние годы находят все более широкое применение в различных приложениях – от энергетики и электроники до авиационно-космических технологий [1, 2]. В частности, подобные материалы могут использоваться для эффективного охлаждения элементов энергетического оборудования и электроники каплями охлаждающих жидкостей [3], особенно при сильном перегреве поверхности выше точки кипения жидкостей. Рассеяние тепла от горячих поверхностей через охлаждающие капли ограничено точкой Лейденфроста (LFP), когда изолирующая паровая пленка предотвращает прямой контакт между охлаждающей каплей и горячей поверхностью.

В рамках настоящей работы были проведены исследования графеновых нанокомпозитов, включающие полученные под давлением таблетки графеновых хлопьев [3], графеновых хлопьев с полимером (эпоксидная смола), графеновых хлопьев с добавлением наночастиц BN, AlN и Al₂O₃. Для всех образцов были измерены контактные углы как функции температуры поверхности, режимы испарения и кипения капель воды (диаметром около 2 мм) в подрежимах постоянного контактного угла и постоянной контактной линии.

Зависимости скорости испарения капель воды на поверхности нанокомпозитов представлены на рис. 1.

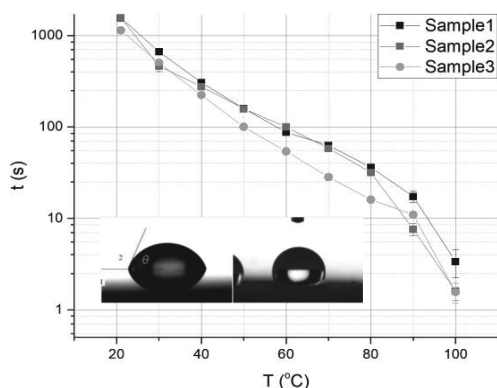


Рис.1. Зависимости скорости испарения капель воды на поверхности различных нанокомпозитов

Зависимости контактного угла от времени при испарении капель воды при различных температурах подложек показаны на рис. 2 (здесь поверхность – GNF). Хорошо видно, что испарение происходит на начальном этапе всегда в режиме постоянного контактного угла. Затем наступает переход к режиму постоянной контактной линии, а контактный угол, естественно, уменьшается. Такое поведение говорит о сложном характере процесса испарения на поверхности нанокомпозитов по сравнению с динамикой

испарения на гладкой (например, металлической) подложке.

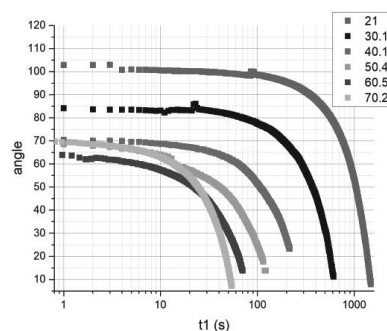


Рис.2. Зависимость контактного угла от времени при испарении капль воды

Были изучены также режимы кипения капель воды на графеновых подложках (рис. 3). В режиме Лейденфроста (в весьма узком диапазоне температур – от 170°C до 200°C) наблюдается стабильный эффект Лейденфроста (фото слева). При повышении температуры (>200°C) наблюдаются режимы срыва точки Лейденфроста и переход к взрывному вскипанию капль жидкости. Аналогичное явление наблюдалось в [4] на металлических микроструктурированных поверхностях.

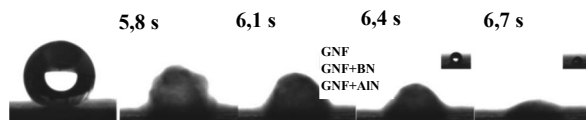


Рис.3. Капли воды на поверхности графенового нанокомпозита в режиме Лейденфроста и при срыве последнего

Полученные данные говорят о новых термогидродинамических явлениях на поверхности функциональных наноматериалов, что требует дополнительного исследования.

Список литературы:

1. А.С. Дмитриев Введение в нанотеплофизику. М.: БИНОМ, 2015. 756 с.
2. P. Zhang, F. Lv. A review of the recent advances in superhydrophobic surfaces and the emerging energy-related applications. Energy, 82, 2015, P. 1068–1087.
3. A.A. Dmitriev, A.S. Dmitriev, I. Mikhailova. New Nanocomposite Thermal Interface Materials Based on Graphene Flakes, Mesoscopic Microspheres and Polymers. MATEC Web of Conferences. 207, 04002, ICMMPM 2018.
4. S. Sajadi, P. Irajizad, V. Kashyap, N. Farokhnia, H. Ghasemi. Surfaces for high heat dissipation with no Leidenfrost limit. Appl. Phys. Lett. July 2017. DOI: 10.1063/1.4993775.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 17-19-01757)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В МИКРОСТРУКТУРАХ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Гимадеев А.В., Абрамова О.А., Питюк Ю.А., Фаткуллина Н.Б.

Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем, Башкирский государственный университет
450076, Россия, Уфа, ул. З. Валиди, 32А

Данная работа посвящена трехмерному моделированию течения вязкой жидкости и исследованию особенностей гидродинамических потоков в областях сложной геометрии при малых числах Рейнольдса. В настоящее время существует ограниченное количество решений подобных задач. Компьютерное моделирование позволяет планировать, частично заменять и существенно дополнять лабораторные исследования по изучению течения вязкой жидкости в таких областях в широком диапазоне значений различных параметров.

Моделирование медленных течений в сложных трехмерных областях имеет значение для микрогидродинамики при создании лабораторий-на-чипе, применяющихся, к примеру, для изучения многостадийных биохимических процессов, в которых одним из управляющих механизмов является перемешивание реагентов.

Поэтому понимание основ микромасштабных течений и способы управления ими играют важную роль в разработке новых технологий, значимых для российской экономики. Кроме того, развитие современного гибкого кастомизированного производства тесно связано с развитием компьютерных технологий проектирования, моделирования, оптимизации и тестирования, которые, в свою очередь, основаны на прогрессе фундаментальных исследований во многих областях.

В качестве основы численного подхода для решения рассматриваемых задач выбран метод граничных элементов (МГЭ) [3], который очень эффективен при исследовании трехмерных задач в бесконечных областях и областях со сложной геометрией, поскольку все расчеты связаны только с границей моделируемых объектов. Программная реализация предусматривает выбор оптимальных алгоритмов в зависимости от размера задачи. В случае крупномасштабных задач при расчетах использовался МГЭ, ускорение которого произведено за счет быстрого метода мультиполей, реализованного на гетерогенных вычислительных архитектурах (многоядерные CPU и графические процессоры). Такой подход разработан авторами ранее [1, 2] и успешно применялся для моделирования Стоксовых течений в различных областях.

Проводились расчеты по изучению картин течения вокруг препятствий внутри различных микроструктур. Исследовалось влияние расположения и геометрии недеформируемых объектов на гидродинамический поток окружающей жидкости. Рассматривалось образование застойных зон при обтекании структур одинарной и двойной пористости (см. рис. 1). Варьировалось расстояние между отдельны-

ми цилиндрическими элементами, помещенными в прямоугольный микроканал.

Кроме того, разработана триангуляция структур с неровными стенками, с выступами различного размера, формы и взаимного расположения. Осуществлялись расчеты по изучению влияния геометрии области на образование застойных зон и отрывных течений, что позволит более детально изучить особенности, научиться предсказывать и контролировать картину течения в той или иной геометрии.

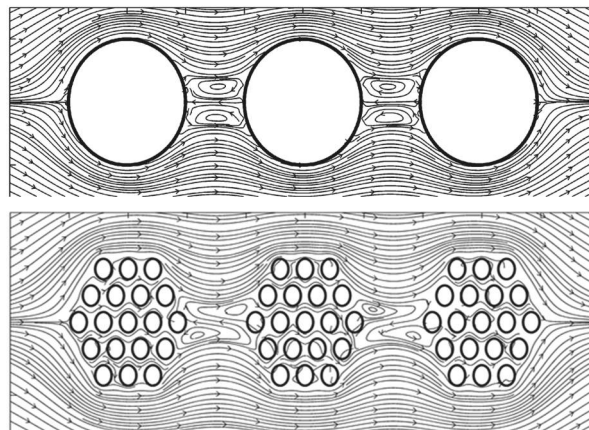


Рис. 1. Линии тока при течении вязкой жидкости вокруг цилиндрических элементов в структурах одинарной и двойной пористости.

Полученные в рамках работы результаты исследования особенностей течений в областях различной конфигурации могут использоваться при проектировании и кастомизированном производстве микроустройств, например микротеплообменников, а также при подборе оптимальных технологических режимов и параметров геометрии в микроэлектронике при использовании жидкостных систем.

Список литературы:

1. Abramova, O.A., Pityuk, Yu.A., Gumerov, N.A., Akhatov, I.Sh. High performance BEM simulation of 3D emulsion flow // Communications in Computer and Information Science (CCIS). – 2017. – Vol 753. pp. 317–330.
2. Pityuk Yu.A., Abramova O.A., Fatkullina N.B., Bulatova A.Z. BEM Based Numerical Approach for the Study of the Dispersed Systems Rheological Properties // Studies in Systems, Decision and Control. – 2018. – V 15, pp. 338–352.
3. Pozrikidis C. Boundary Integral and Singularity Methods for Linearized Viscous Flow. – 1992 (Cambridge University Press, Cambridge, MA).

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-549.2019.1

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОЖИДКОСТЕЙ
ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ЛАМИНАРНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ****Гузей Д.В.^{1,2}, Минаков А.В.^{1,2}, Пряжников М.И.^{1,2}**¹ Сибирский федеральный университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободной, 79² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Повышение производительности теплообменных аппаратов становится основной проблемой при проектировании различных теплотехнических систем. В некоторых случаях решение этой проблемы является весьма критичным, поскольку оно в целом определяет дальнейшее развитие соответствующих систем.

Целью работы является анализ эффективности использования наножидкостей для интенсификации теплообмена в ламинарном режиме течения. Для этого было проведено экспериментальное исследование ламинарного теплообмена наножидкостей в цилиндрическом канале при постоянном тепловом потоке на стенке. Число Рейнольдса варьировалось в диапазоне от 10 до 1500. В экспериментах использовались наножидкости на основе двух базовых жидкостей: дистиллированной воды и этиленгликоля. Для приготовления наножидкостей использовались наночастицы оксидов металлов (Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2) и алмаза. Средний размер наночастиц варьировался от 5 до 150 нм. Объемная концентрация наночастиц варьировалась в диапазоне от 0 до 6 объемных процентов. В экспериментах измерялись средние и локальные значения коэффициентов теплоотдачи на стенках канала, а также величина перепада давления в канале.

Показано, что добавление наночастиц в теплоноситель существенно влияет на коэффициент теплоотдачи в ламинарном режиме течения. Было обнаружено, что коэффициент теплоотдачи при фиксированном расходе и числе Рейнольдса ведут себя совершенно по-разному. Интенсификация теплообмена при фиксированном числе Рейнольдса значительно превышает величину интенсификации теплообмена при фиксированном расходе. Было обнаружено, что в случае ламинарного режима течения коэффициент теплоотдачи возрастает с увеличением концентрации наночастиц при фиксированном числе Рейнольдса, так и при фиксированном значении расхода теплоносителя. Это существенно отличается от теплообмена в турбулентном режиме течения, в котором при фиксированном расходе теплоносителя коэффициент теплоотдачи может уменьшаться с увеличением концентрации частиц.

Исследование зависимости коэффициента теплоотдачи от размера наночастиц показало, что в ламинарном режиме течения при фиксированном расходе коэффициент теплоотдачи всегда возрастает с увеличением размера частиц. В случае фиксированных значений числа Рейнольдса зависимость коэффициента теплоотдачи от размера наночастиц может иметь максимум.

Также было показано влияние материала наночастиц на коэффициент теплоотдачи. Зависимость коэффициента теплоотдачи от материала наночастиц

полностью обусловлена теплофизическими свойствами наножидкости. Прежде всего, вязкостью и теплопроводностью.

Интенсификация коэффициента теплоотдачи также зависит от свойств базовой жидкости, наножидкость на основе жидкости с более низкой теплопроводностью имеет более высокий прирост коэффициента теплоотдачи.

Таким образом, было показано, что интенсификация коэффициента теплоотдачи за счет использования наножидкостей является нетривиальной проблемой. Величина интенсификации теплоотдачи зависит от соотношения вязкости и теплопроводности наножидкости, а, следовательно, от материала частиц и их размера.

Но также было показано, что поведение числа Нуссельта для наножидкостей существенно отличается от поведения коэффициента теплоотдачи. Проведенный анализ зависимости числа Нуссельта от числа Пекле для различных наножидкостей показывает, что число Нуссельта в пределах погрешности эксперимента практически не зависит от концентрации, размера и материала наночастиц. Это говорит о том, что теплопередача наножидкостей в ламинарном режиме определяется изменением теплофизических свойств наножидкостей.

Говоря об эффективности использования наножидкости для охлаждения, мы всегда должны учитывать мощность, потребляемую насосом для прокачивания жидкости. С этой целью в этой работе систематически измерялась величина перепада давления в канале. Однако коэффициент сопротивления пропорционален коэффициенту вязкости, а вязкость наножидкостей значительно превышает вязкость базовой жидкости. Следовательно, гидравлическое сопротивление наножидкостей значительно выше, чем у базовой жидкости. Однако положительным аргументом с точки зрения использования наножидкостей в качестве рабочей жидкости в различных тепловых устройствах является то, что теплопроводность наножидкости (и, следовательно, коэффициент теплоотдачи) возрастает с увеличением размера частиц, тогда как коэффициент вязкости, напротив, падает с увеличением размера частиц. Поэтому с точки зрения затрат энергии на прокачивание теплоносителя всегда можно найти определенный оптимум.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ Сибирскому федеральному университету в 2019 (номер 16.8368.2017/БЧ).

ГЕНЕРАЦИЯ ПАРА В ГРАФЕНОВЫХ НАНОЖИДКОСТЯХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЛАНКОВСКОГО СОЛНЕЧНОГО СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ

Дмитриев А.С., Ивлев Н.Ф., Михайлова И.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва
111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., 14

Исследования последних лет однозначно показали, что эффективность преобразования излучения в системах солнечной теплоэнергетики в значительной степени связана с морфологией поверхностей поглощения и выбором рабочих жидкостей [1, 2]. В качестве рабочих жидкостей наиболее эффективно использование наножидкостей: базовая жидкость представляет собой известные теплоносители (вода, этилен-гликоль и т.п.); наноразмерные наполнители – углеродные (фуллерены, нанотрубки, наноалмаз, графен и его производные), керамические, а также наночастицы, в основном благородных металлов (золото, серебро, платина), имеющие сильные наноплазмонные эффекты нагрева.

В данной работе проведен анализ теплофизических процессов при нагреве графеновых наножидкостей солнечным излучением планковского спектра для задач солнечной теплоэнергетики на основе графеновых наножидкостей. Показано, что при подобном нагреве наножидкостей формируются локальные зоны генерации паровых пузырей, связанные с резонансной наноплазмоникой, дающие высокий коэффициент преобразования в пар.

Графеновые хлопья (толщина от 3 до 5 нм, латеральный размер – 15–30 мкм) были получены по технологии [3]. Проведено два вида тестов – испарение наножидкости из объема, а также с поверхности различных материалов, покрытых слоем графена, с применением имитатора солнечного излучения фирмы NPH (модель NQE). На рис. 1. показаны кривые скоростей испарения на алюминиевой подложке без графенового слоя и в его присутствии.

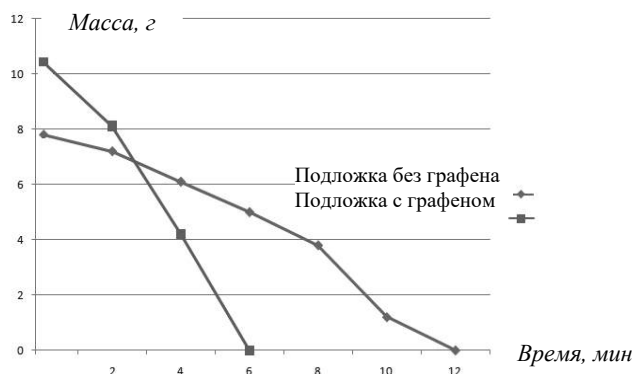


Рис. 1. Скорость испарения воды на подложках.

Другой вариант – генерация пара из объема наножидкости. В этом случае наножидкость с различной концентрацией графеновых хлопьев (от 1 до 3%) нагревалась имитатором солнечного излучения. Поток мощности, за сет расстояния от объема нагрева и имитатора варьировался. Что позволило менять поток от 0,85 до 1,3 Вт/м·К. Результаты скоростей ис-

парения при различных концентрациях графеновых хлопьев представлены на рис. 2. Здесь приведены расчетные результаты, полученные в [4, 5]. Нетрудно видеть, что наблюдается хорошее согласие опытных данных с результатами расчетов.

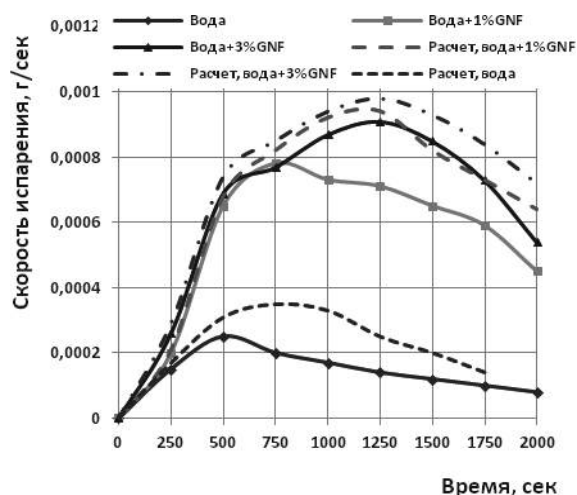


Рис. 2. Скорости испарения различных графеновых наножидкостей.

Измерение температуры наножидкости при объемном нагреве показали, что она не превышала 44–46°C, в то время как температура пара была в диапазоне 86–95°C. Последнее означает, что в подобных экспериментах с наноплазмонным локализованным нагревом наблюдается сильная неравновесность, что подтверждается имеющимися теоретическими моделями.

Список литературы:

1. Z. Deng et al. An emergence of solar thermal utilization: solar-driven steam generation. *J. Mater. Chem.* 2017. V. 17. 7691–7709.
2. K. Leong, et al. An overview on current application of nanofluids in solar thermal collector and its challenges// *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016. 531092–1105.
3. A.A. Dmitriev, A.S. Dmitriev, I. Mikhailova. New Nanocomposite Thermal Interface Materials Based on Graphene Flakes, Mesoscopic Microspheres and Polymers. *MATEC Web of Conf.* 207, 04002 (2018), ICMMPM 2018.
4. А.С. Дмитриев. Солнечная теплоэнергетика на базе функциональных наноматериалов. Межд. конф. «Альтернативная и интеллектуальная энергетика». Воронеж, 6–8 декабря 2018г., с. 215–216.
5. A.S. Dmitriev. Solar heat power engine on the basis of direct conversion of the Planck spectrum of solar radiation with the use of nanofluids// *Int. Conf. Ren. Energy – ICREN* 2018. April 25–27, 2018.

Работа частично поддержана Российским научным фондом (грант № 17-19-01757)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОСАЖДЕНИЯ ПРИ СТРУЙНОМ ОСАЖДЕНИИ АЛМАЗА

Емельянов А.А., Ребров А.К., Тимошенко Н.И., Юдин И.Б.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Одним из наиболее перспективных методов осаждения алмазов из газовой фазы является метод плазмохимического газофазного осаждения алмазных пленок с использованием безэлектродных микроволновых разрядов в газовых смесях, содержащих углеводороды. Для проведения экспериментальных исследований процессов роста алмазных структур с использованием высокоскоростных потоков газов, активированных СВЧ-разрядом, была создана установка, схема которой представлена на рис.1.

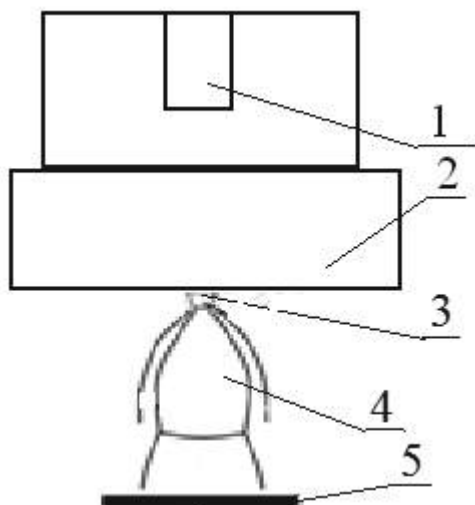
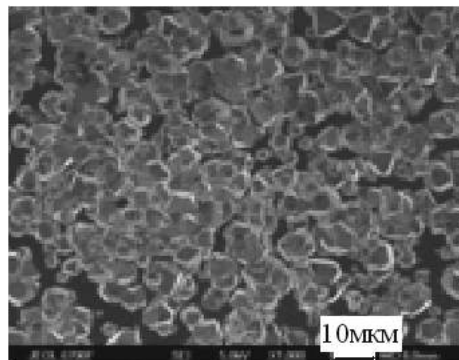


Рис. 1. Схема экспериментального участка:
1 – магнетрон-СВЧ-излучатель 2 – форкамера, 3 – сопло,
4 – сверхзвуковая струя, 5 – подложка.

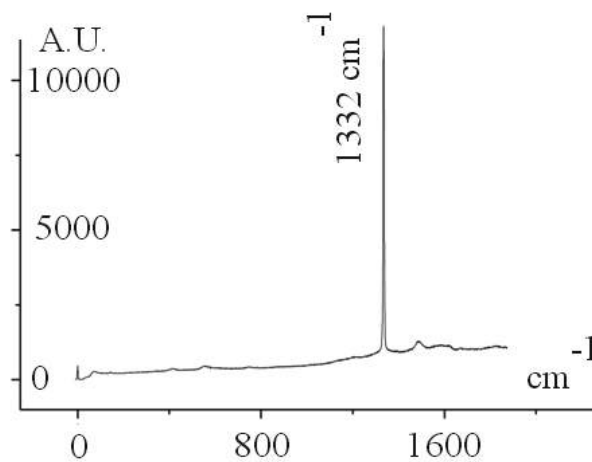
Для генерации разряда применяется бытовой СВЧ-магнетрон LG 2M246 с водяным охлаждением в соответствии с рекомендациями [1]. В вакуумной камере имеются кварцевые смотровые окна, что позволяет проводить спектральные измерения.

Смесь H_2 и CH_4 активировалась СВЧ-разрядом с частотой 2,45 ГГц с излучаемой мощностью до 3 кВт. Температура подложки измерялась Х-А термопарой, давление в форкамере баротроном, расход H_2 и CH_4 расходомером. Температура торможения T_0 определялась через измеренные давление торможения P_0 , объемный расход Q_n при нормальных условиях ($P_n=105\text{Па}$ и $T_n=300\text{К}$) и параметрах газа и сопла с использованием изоэнтропических соотношений.

$$T_0 = \left(\frac{P_0}{\left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}}} \sqrt{\frac{2\gamma R}{m(\gamma+1)}} \frac{\pi d^2 T_n}{4 P_n Q_n} \right)^2$$



а)



б)

Рис. 2. СЭМ фотография(а) и КРС спектр (б).
Содержание $CH_4=1\%$, температура подложки 580°C .

На рис. 2 представлены фотография полученной алмазной плёнки и спектр КРС.

На электронных снимках видно, что с увеличением температуры подложки растут размеры кристаллов и их плотность. Наблюдаются все грани алмазного кристалла: треугольные, квадратные и ромбические. На снимках с большим увеличением видны углеродные структуры, образующиеся на алмазных гранях.

Показана работоспособность газоструйного метода осаждения с активацией смеси H_2+CH_4 СВЧ разрядом. Реализовано осаждение алмаза при низкой температуре подложки 524°C . Получена зависимость структуры осаждаемой пленки от температуры подложки.

Список литературы:

1. В. Н. Тихонов, И. А. Иванов, А. Е. Крюков, А. В. Тихонов. Бюджетные генераторы для микроволновых плазмотронов. Прикладная физика, 2015, № 5 с.102–106.

Работа выполнена при госбюджетной поддержке
и гранта РФФИ №18-29-19069

ЗОНДОВАЯ ПОДАЧА МЕТАНА ПРИ ГАЗОСТРУЙНОМ СИНТЕЗЕ АЛМАЗНЫХ СТРУКТУР

Емельянов А.А., Плотников М.Ю., Юдин И.Б.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Метод газофазного осаждения с использованием термической активации газов-предшественников широко применяется для синтеза алмазных структур. В последние годы активно развивается газоструйная модификация метода [1–4]. Проведенное численное исследование [5] показало широкие возможности выбора условий разложения метана для обеспечения оптимальных условий при газоструйном синтезе алмазных структур. В экспериментах использовалась раздельная подача метана и водорода (рис. 1).

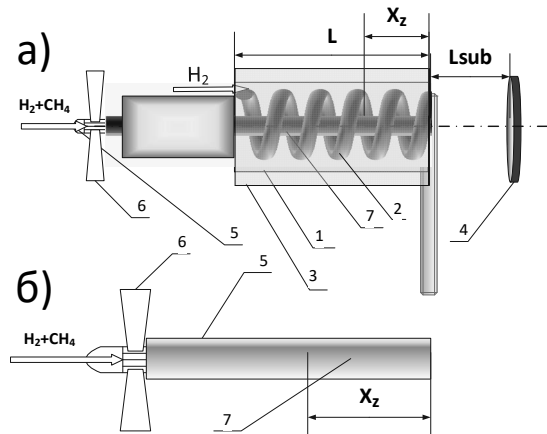


Рис. 1. Схема зондового активатора (а); схема зонда для подачи метана (б). 1 – водородный канал, 2 – вольфрамовая спираль, 3 – тепловой экран, 4 – молибденовая подложка, 5 – водоохлаждаемый зонд для подачи смеси H_2+CH_4 , 6 – охлаждение зонда, 7 – защитная трубка для зонда.

Водородный канал 1 диаметром 13 мм и трубка 7 диаметром 4 мм выполнены из вольфрамовой фольги толщиной 30 мкм. Внутри водородного канала коаксиально расположена цилиндрическая спираль 2, выполненная из вольфрамовой проволоки диаметром 1 мм. Диаметр теплового экрана 3–17 мм. Горячая часть активатора L в экспериментах имела длину 22 мм, расстояние до подложки L_{sub} составляло 10 мм. Диаметр молибденовой подложки 4 равнялся 30 мм. Длина охлаждаемого водой цилиндрического зонда 5 была 30 мм. В зонд 5 подавалась смесь H_2+CH_4 , в водородный канал – только водород. Температура в канале 7 устанавливалась на уровне 2400 К на расстоянии от среза 5 мм подбором мощности, затрачиваемой на нагрев спирали. Температура зонда 5 имела величину около 300 К. Диаметр выходного отверстия зонда составлял 1 мм. Расстояние между срезом зонда 5 и канала 7 менялось от 2 до 22 мм. Основные параметры экспериментов: время синтеза 3 часа, давление в камере осаждения 20 торр, расход водорода в оба канала по 1500 ссст, расход метана 8 ссст.

Основное отличие представленного исследования от проводимых ранее [1–4] заключается в использо-

вании охлаждаемого зонда для подачи смеси водорода с метаном. В работах [2–4] смесь водорода с метаном подавалась через центральный цилиндрический канал. Температура стенок этого канала нагревалась до 2400 К и вследствие этого происходило неконтролируемое разложение метана вследствие газофазных реакций. Размер граней, синтезируемых таким подходом алмазов, не превышал 30 мкм. В [1] в канал со спиралью подавался только водород, а газовая смесь H_2+CH_4 подавалась через боковую вольфрамовую трубку под углом к оси реактора 45 градусов в пространство между спиралью и подложкой. Температура боковой трубки на расстоянии 5 мм от среза была 1300 К. Отсутствие высокотемпературного разложения метана позволило получить алмазы с размером граней до 60 мкм [1]. Численный анализ течения методом прямого статистического моделирования (ПСМ) показал, что при используемых расходах водорода в условиях эксперимента степень диссоциации водорода на выходе мало зависит от длины канала. В тоже время разложение метана зависит от длины трубки и ее температуры [5].

Представленная работа посвящена численно-экспериментальному исследованию влияния условий разложения метана на рост алмазных структур. Проведены эксперименты по исследованию влияния длины зоны разложения метана X_2 на синтез алмазных структур. Проведено исследование особенностей течения смеси метана с водородом методом ПСМ. Проведенные исследования показали, что при зондовой подаче охлажденного метана в зону разложения и определенном времени пребывания в зоне высоких температур удастся получить более высокие скорости роста алмазных структур.

Список литературы:

1. Rebrov A., Emelyanov A., Kosolobov S., and Yudin I. Diamond crystals deposited from interacting jets //Phys. Status Solidi C. 2015. V.12. N.7. P. 931–933.
2. Емельянов А.А., Ребров А.К., Юдин И.Б. Осаждение алмазных структур из взаимодействующих газовых струй // Журнал Технической Физики. 2016. Т.86. №12. С. 56–59.
3. Rebrov A.K., Andreev M.N., Bieiadovskii T.T., Kubrak K.V. Growth of diamond structures using high speed gas jet deposition activated in heated tungsten channels // Surface & coatings technology. 2017. V. 325. P.210–218.
4. Emelyanov A.A., Plotnikov, Yudin I.B. Influence of the conditions of methane decomposition on gas-jet synthesis of diamond structures //IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – Vol.1105. – 012120.
5. Rebrov A., Plotnikov M., Mankelevich Yu. and Yudin I. Analysis of flows by deposition of diamond-like structures //Phys. Fluids. 2018. V.30. P. 016106.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ
(гранты № 18-08-00295 и 19-08-00533) и гос.задания
(гранты АААА-А17-117022850029-9
и АААА-А17-117030110017-0)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В МИКРОКАНАЛАХ С НЕРОВНЫМИ СТЕНКАМИ

Искандаров А.И., Замула Ю.С., Саметов С.П., Абрамова О.А., Батыршин Э.С., Питюк Ю.А.

Центр микро- и наномасштабной динамики дисперсных систем, Башкирский Государственный Университет, 450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

Изучение особенностей течений в микроканалах с шероховатыми стенками является актуальной проблемой современной науки, поскольку идеально гладкие микроканалы практически не встречаются в природе. Кроме того, получающие все большее распространение микро- и нанотехнологии ставят ряд актуальных задач и диктуют необходимость разработки и производства устройств с микрожидкостными системами, где микроканалы с неровными стенками могут быть использованы. Выявление закономерностей медленных течений вязких жидкостей в таких сложных трехмерных областях имеет значение при создании лабораторий-на-чипе, применяющихся, к примеру, для изучения многостадийных биохимических процессов, в которых одним из управляющих механизмов является перемешивание реагентов. Многопараметрическое исследование характеристик потока жидкости в микроканалах имеет значение для разработки и осуществления корректного управления микромеханическими и микрожидкостными устройствами.

Данная работа посвящена проведению экспериментов для изучения особенностей картин течения вязкой жидкости в микроканалах с неровностями (вырезами) различной геометрии, а также влияния шероховатостей различного масштаба на поверхности стенок микроканала на изменение интегральных характеристик потока жидкости.

Эксперименты осуществлялись с применением самого современного оборудования и технологий.

В первую очередь, были спроектированы микроканалы (см. рис. 1а, б) с шероховатостями различной геометрии: выступы треугольной формы, ловушки прямоугольной формы, клиновидные углубления различных размеров (см. рис. 1в). Чипы с микроканалами были изготовлены методом мягкой литографии, что подразумевает собой использование так называемых «масок», которые предварительно были построены и напечатаны.

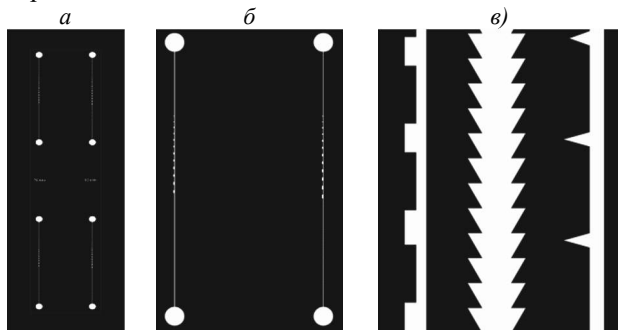


Рис. 1. Маски для изготовления микроканалов и участки с геометрией шероховатостей.

В рамках исследования были созданы несколько чипов из ПДМС с микроканалами с шероховатостями различной геометрии для изучения течения жидкости в них. Средние ширина и высота каналов, длина участка с неровностями соответственно равны 150 мкм, 10 мкм и 20 мм, в свою очередь длина всего канала была равна 30 мм

Наблюдение картин течений производилось на оптическом микроскопе Olympus IX-71. Для этого в микроканалы готового чипа с помощью шприцевого насоса подавалась вода с трассерами. В качестве трассеров применялись флуоресцентные частицы размером 1 мкм. На рис. 2 представлены картины течения в микроканалах с шероховатостями треугольной формы.

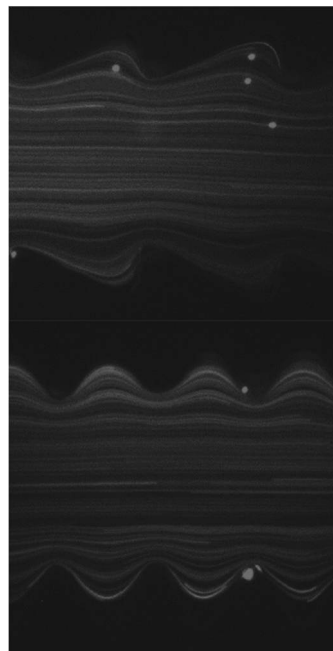


Рис. 2. Картина течения жидкости в микроканале.

Рассматривалось влияние наличия шероховатостей на поверхности микроканалов на изменение интегральных характеристик течения. Эксперименты проводились для различных жидкостей: вода (1,004 мПа·с) и вода с глицерином (1,850 мПа·с), задавался расход 1 мкл/мин, 10 мкл/мин и 20 мкл/мин. Перепад давления варьировался в пределах от 20 Па до 1020 Па. Получены графики зависимости расхода от перепада давления для случаев с различным размером шероховатостей (0 мкм, 50 мкм, 70 мкм).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-20102

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЯЗКОСТИ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ С НАНОЧАСТИЦАМИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Михиенкова Е.И.¹, Минаков А.В.^{1,2}, Пряжников М.И.^{1,2}

¹ Сибирский федеральный университет,
660041, Россия, Красноярск, пр. Свободный, 79

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Вязкость и реология буровых растворов играют важнейшее значение для их применения, поскольку от них зависят потери давления при промывке скважины, эффективность выноса шлама, устойчивость ствола скважины и многие другие факторы при бурении. При строительстве скважин в областях аномально высоких пластовых температур необходимо иметь буровые растворы со стабильной вязкостью и реологией [1–3].

Было проведено систематическое изучение зависимости вязкости от температуры более чем для 15 различных буровых растворов с добавкой наночастиц. В качестве базовой модели бурового раствора применялись водные суспензии различных глинистых растворов. В результате измерений определялась зависимость вязкости буровых растворов, модифицированных наночастицами, от скорости сдвига, концентрации, размера и вида используемых наночастиц при различной температуре.

Вначале было подробно исследовано влияние концентрации наночастиц на температурную зависимость вязкости буровых растворов. Для этого были рассмотрены глинистые буровые растворы с массовой концентрацией глины 5%. Растворы были модифицированы наночастицами оксида кремния со средним размером около 10 нм. Концентрация наночастиц варьировалась от 0 до 3 мас.%. Анализ температурной зависимости показал, что с увеличением температуры, несмотря на то, что вязкость дисперсионной среды (в данном случае воды) снижается, вязкость глинистых суспензий значительно возрастает. Это связано с тем, что с увеличением температуры происходит уменьшение толщины сольватной оболочки гидратированных частиц бентонита. Это существенно облегчает их коагуляцию и флокуляцию, которые, в свою очередь, ведут к повышению эффективной вязкости. Было установлено, что повышение температуры с 25 до 80 градусов приводит к повышению эффективной вязкости глинистой суспензии более чем в 10 раз.

Исследования показали, что у модифицированных наночастицами глинистых растворов с увеличением температуры вязкость также повышается. Однако это повышение не столь существенное как для базовой глинистой суспензии. Так, для бурового раствора с 3 мас.% наночастиц оксида кремния размером 10 нм при повышении температуры с 25 до 80 градусов эффективная вязкость увеличивается примерно в 2,5 раза.

Далее было исследовано влияние размера наночастиц. Для этого были рассмотрены глинистые суспензии добавкой наночастиц оксида алюминия. Массовая концентрация наночастиц была равной 2%. Размер частиц варьировался от 43 до 150 нм.

Было показано, что с уменьшением размера наночастиц эффективная вязкость буровых растворов возрастает при всех рассмотренных температурах. С другой стороны, было показано, что с увеличением температуры увеличивается вязкость суспензий для всех размеров наночастиц. Анализ относительной вязкости (приведенной к вязкости растворов при комнатной температуре) показал, что с уменьшением размера наночастиц действие температуры на вязкость глинистой суспензии возрастает. Так при повышении температуры до 55°C относительная вязкость глинистой суспензии с наночастицами оксида алюминия 150 нм возрастает в 1,4 раза, а с частицами размером 43 нм в 1,7 раза.

Помимо концентрации и размера наночастиц было исследовано влияние материала наночастиц на вязкость буровых суспензий с изменением температуры. Для этого были отобраны наносуспензии с максимально близким по возможности средним размером наночастиц. Это были наночастицы оксида кремния с размером 40 нм и алюминия – 43 нм. Несмотря на то, что наночастицы имеют близкий средний размер частиц, при одинаковой концентрации наночастиц вязкость бурового раствора в зависимости от температуры существенно разная.

В общем случае вязкость модифицированных наночастицами буровых растворов менее подвержена влиянию температуры, что очень важно для их практического применения.

Список литературы

1. Minakov A.V., Mikhienkova E.I., Neverov A.L., Buryukin F.A. An experimental study of the effect of nanoparticle additives on the rheological properties of a suspension. *Technical Physics Letters*. 2018. V. 44 (5). P. 367–370.
2. Minakov A.V., Mikhienkova E.I., Zhigarev V.A., Neverov A.L., Rudyak V. Ya. A study of the influence of nanoparticles on the properties of drilling muds. *Colloid Journal*. 2018. V. 80 (4). P. 418–426.
3. Minakov A.V., Mikhienkova E.I., Zhigarev V.A., Neverov A.L. An experimental study of the influence of added nanoparticles on the filtration of microsusensions via porous media. *Technical Physics Letters*. 2018. V. 44 (6). P. 532–534.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
фонда РФ (грант № 17-79-20218)*

*Исследование выполнено при поддержке краевого
государственного автономного учреждения
«Красноярский краевой фонд поддержки научной и
научно-технической деятельности» «в рамках
реализации проекта «Конкурс по организации
участия студентов, аспирантов и молодых ученых в
конференциях, научных мероприятиях и
стажировках»: Всероссийская научная конференция
«Теплофизика и физическая гидродинамика»
с элементами школы молодых ученых, 2019 г.*

Роньшин Ф.В.^{1,2}, Дементьев Ю.А.^{1,2}, Чиннов Е.А.^{1,2}¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Развитие технологий теплообменников с микро- и наноразмерами показывает, что такие системы оказываются гораздо более энергоэффективными, чем макросистемы с размерами каналов более 1 мм. Существующие системы охлаждения не позволяют обеспечить современные требования по отводу тепла от высокотемпературных источников в электронном и микроэлектронном оборудовании. Одним из эффективных решения является использование микроканальных систем, которые получают все более широкое распространение в микроэлектронике, в аэрокосмической промышленности, транспорте и энергетике. Обзор работ по режимам двухфазных течений в каналах различной геометрии содержится в [1]. В большинстве работ используются длинные микроканалы, однако короткие каналы являются более перспективными для охлаждения миниатюрных устройств с высоким тепловыделением, таких как микрочипы. В теплообменниках на основе коротких микроканалов могут быть достигнуты достаточно малые перепады давления. Кроме того, во многих работах исследователи используют каналы с круглым сечением, хотя применение прямоугольных каналов оказывается перспективнее в системах термостабилизации.

В данной работе проведены экспериментальные исследования режимов течения в прямоугольных мини- и микроканалах. Разработана новая методика измерения характеристик двухфазного потока в щелевых микроканалах основанная на анализе изображений фрагментов двухфазных течений (пузырьков, капель, областей пленки на верхней и нижней стенках канала). Предложен новый способ определения границ режимов двухфазного течения на основе количественных критериев, полученных при помощи разработанной методики. Для исследуемых каналов построены режимные карты, где границы между режимами определены при помощи количественных критериев. Проведено сравнение режимных карт с литературными моделями. Выявлено, что ширина микроканала оказывает существенное влияние на характеристики двухфазного течения и приводит к появлению новых режимов течения и их неустойчивости. Выявлены новые закономерности влияния ширины канала на переход к кольцевому режиму. Предложена модель для перехода от раздельного к кольцевому режиму, базирующаяся на обнаруженном факте: структурирование струй жидкости по каналу.

Исследовано влияние высоты канала на двухфазное течение. При уменьшении высоты канала начинают появляться новые эффекты, рис. 1. Пунктирной линией и закрашенной желтой областью показана относительная область вспененного режима S , определяемый как отношение площади вспененного режима на карте к максимальной площади вспененного

режима на карте (в канале высотой 50 мкм). Видно, что область вспененного режима существенно увеличивается, причем при переходе микроканалов высотой 200–100 мкм ($\sim 0,05$ капиллярной постоянной 1σ) тенденция меняется. Вспененный режим не наблюдается в горизонтальных макроканалах и является особенностью микроканалов. В микроканалах высотой менее 300 мкм гравитация не оказывает существенного влияния на режим двухфазного течения [1]. В микроканалах, высотой менее 300 мкм появляется новая особенность режимов течения – образование капель. С уменьшением высоты канала интенсивность образования капель растет. В микроканалах, высотой менее 150 мкм в условиях хорошей смачиваемости обнаружен капельный режим течения. В микроканалах высотой менее 150 мкм существенное влияние на образование режимов течения начинает оказывать фронтальная неустойчивость, когда режим течения формируется непосредственно возле сопла жидкости. Таким образом, можно видеть, что при уменьшении микроканалов при высоте 100–200 мкм наблюдаются новые эффекты, не свойственные макро- и микроканалам. Следовательно, можно сказать, что именно таким размером ограничена высота микроканалов.

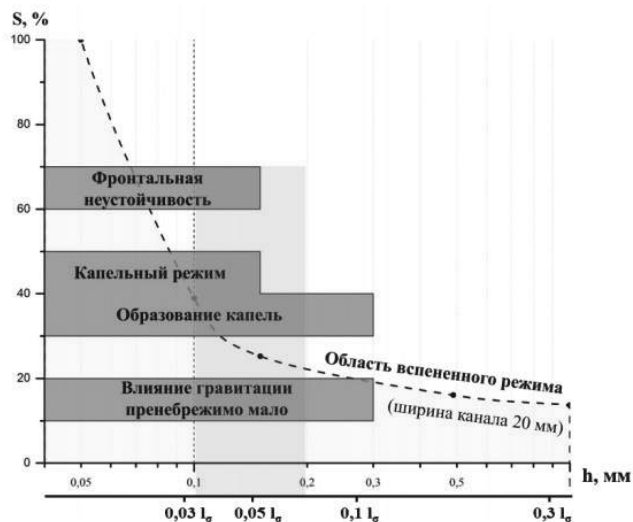


Рис. 1. Особенности режимов течения в мини- и микроканалах.

Список литературы:

1. Чиннов Е.А., Роньшин Ф.В., Кабов О.А. Режимы двухфазного течения в микро- и микроканалах (обзор) // Теплофизика и Аэромеханика. 2015. Т. 22. № 3. С. 275–297.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (соглашение № 18-19-00407)

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА ПРОЦЕСС СИНТЕЗА НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА В КОМПОЗИТНОМ ФТОРПОЛИМЕРНОМ ПОКРЫТИИ, ПОЛУЧЕННОМ КОМБИНАЦИЕЙ МЕТОДОВ ВАКУУМНОГО ГАЗОСТРУЙНОГО ОСАЖДЕНИЯ И NW CVD

Сафонов А.И., Тимошенко Н.И., Суляева В.С., Старинский С.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Наночастицы благородных металлов обладают уникальным оптическим свойством – нелинейным откликом на падающее излучение видимого диапазона, именуемым поверхностным плазмонным резонансом (ППР). Это явление привлекательно для использования в различных приложениях, таких как: фотовольтаика, фотокатализ, производство биосенсоров и антибактериальных покрытий и др. [1, 2]. Известно, что положение пика ППР и интенсивность поглощения сильно зависят от материала, размера наночастиц, их формы, расстояния между ними, а также диэлектрической проницаемости окружающей среды, в которую они включены [3]. Кроме того, наночастицы металлов являются весьма активными и легко взаимодействуют с окружающей средой, теряя свои уникальные свойства. Одним из способов их защиты является помещение их в матрицу различных материалов, в частности фторполимеров. Разработано несколько различных методов синтеза нанокомпозитов типа металл-диэлектрик, характеризующиеся своими преимуществами и недостатками.

Цель представленной работы – изучить возможность формирования наночастиц металла из его тонких пленок (до 10 нм) путём их отжига под слоем фторполимера.

В данной работе, тонкие пленки золота различной толщины были осаждены методом вакуумного газоструйного осаждения [4]. Поверх пленок наносился тонкий слой фторполимера различной толщины методом HWCVD [5]. Далее полученные композитные покрытия отжигались в вакууме при температуре 400°C. Морфология, толщина и скорость роста золотых покрытий, композитов и их модификаций были изучены и определены методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Оптические свойства исследовались с помощью оптической спектроскопии.

Было показано, что при отжиге тонких пленок золота толщиной порядка 2 нм, не покрытых (Рис. 1(а)) и покрытых (Рис. 1(б)) фторполимерным покрытием, формируются сферические частицы. Размер наночастиц, сформированных под слоем фторполимерного покрытия, меньше, чем сформировавшихся без покрытия. В тоже время, при отжиге тонких пленок золота толщиной менее 4 нм, покрытых и не покрытых фторполимером, формируются наночастицы золота одного размера.

Таким образом, наличие фторполимерного покрытия влияет на размер синтезируемых наночастиц

золота при отжиге его тонких пленок толщиной более 4 нм.

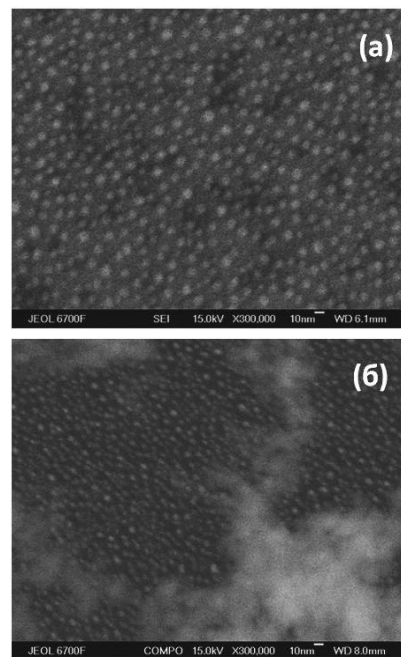


Рис.1. Морфология отожженных пленок золота толщиной 2 нм не покрытых (а) и покрытых фторполимером (б).

Установлено, что изменение толщины фторполимерного покрытия в диапазоне от 10 до 40 нм не влияет на морфологию, формирующихся при отжиге наночастиц золота.

Измерение оптических свойств тонких пленок золота и композитов на их основе подтверждают результаты и выводы, полученные с помощью электронной микроскопии.

Список литературы:

1. Наноплазмоника / В.В. Климов; М.: ФИЗМАТЛИТ. 2010. 480с.
2. Плазмоника. Теория и приложения / С.А. Майер Москва, 2011. 296 с.
3. Stockman M.I. Nanoplasmonics: The physics behind the applications // Physics Today. 2011. V. 64. P. 39–44.
4. Андреев М.Н., Ребров А.К., Сафонов А.И., Тимошенко Н.И. Синтез серебряных наночастиц газоструйным методом // Российские нанотехнологии. 2011. Т. 6. С. 85–88.
5. Safonov A.I., Sulyaeva V.S., Gatapova E.Ya., Starinskiy S.V., Timoshenko N.I., Kabov O.A. Deposition features and wettability behavior of fluoropolymer coatings from hexafluoropropylene oxide activated by NiCr wire // Thin Solid Films. 2018. V. 653. P. 165–172.

Работа выполнена при госбюджетной поддержке и поддержке Программы президентства РАН 1.1.16

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ В ЯЧЕЙКЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ПОДОГРЕВЕ ЕЕ ГРАНЕЙ

Тухбатова Э.Р., Замула Ю.С., Валиуллина В.И., Мусин А.А., Ковалева Л.А.

Башкирский государственный университет,
450076, Россия, РБ, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32

Разделение водонефтяных эмульсий при подготовке нефти к товарному виду является одной из основных задач в нефтегазовой отрасли. Широко применимым методом разрушения эмульсионных систем является термическая обработка нефти. Возникновение и развитие термоконвективных течений при этом неизбежно. Для эффективного применения метода необходимо знать порог теплового воздействия, так как при сильном нагреве скорость конвективных течений может быть настолько велика, что может препятствовать разделению эмульсионной системы [1].

Целью настоящей работы является исследование динамики дисперсных систем в прямоугольной вертикальной ячейке при подогреве ее граней методами физического и математического моделирования.

Экспериментальные исследования проводятся в прямоугольной вертикальной ячейке, внутренняя полость которой имеет размеры 50x50x10 мм (рис. 1).

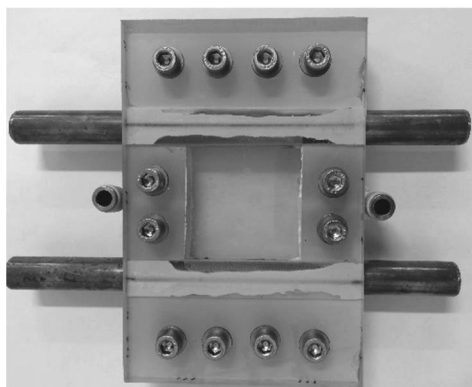


Рис. 1. Экспериментальная ячейка.

В качестве дисперсной среды в первом приближении используется суспензия, в основе которой лежат твердые частицы, взвешенные в глицерине. Вертикальные стенки выполнены из поликарбоната, горизонтальные – из меди. Поддержание градиента температур осуществляется за счет циркуляции воды в медных трубках, температура жидкости задается с помощью двух отдельно стоящих термостатов (рис. 2).

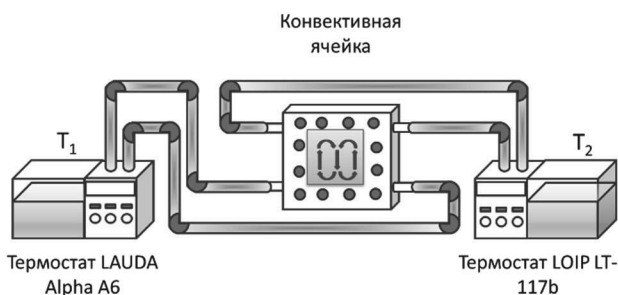


Рис. 2. Схема установки.

Для моделирования результатов экспериментальных исследований и дальнейшего изучения динамики дисперсных систем, разработана диффузионная математическая модель, которая базируется на системе уравнений тепловой конвекции в приближении Буссинеска [2]. На верхней и нижней границе задается постоянная различная температура, на боковых гранях – теплообмен с окружающей средой.

Моделирование задачи проводится в программном пакете OpenFOAM, предназначенном для решения задач механики сплошных сред. В результате численного моделирования получены картины течения, возникающие в дисперсной системе при подогреве граней ячейки (рис. 3).

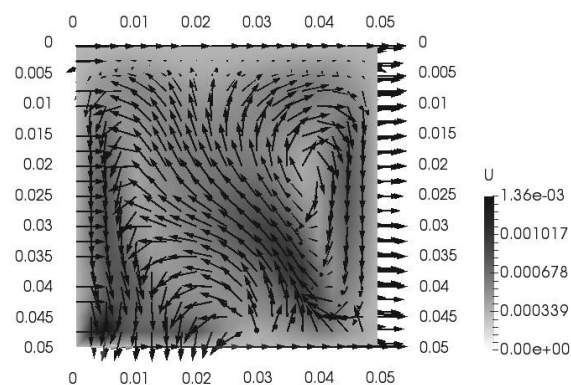


Рис. 3. Формирование конвективных потоков в ячейке.

Проведены тестовые испытания экспериментальной установки и валидация программного инструмента.

Адаптация математической модели проводится путем сравнения результатов физического и математического моделирования. Исследуется динамика расслоения дисперсной системы при наличии свободноконвективных течений в жидкости, в зависимости от параметров задачи.

Список литературы:

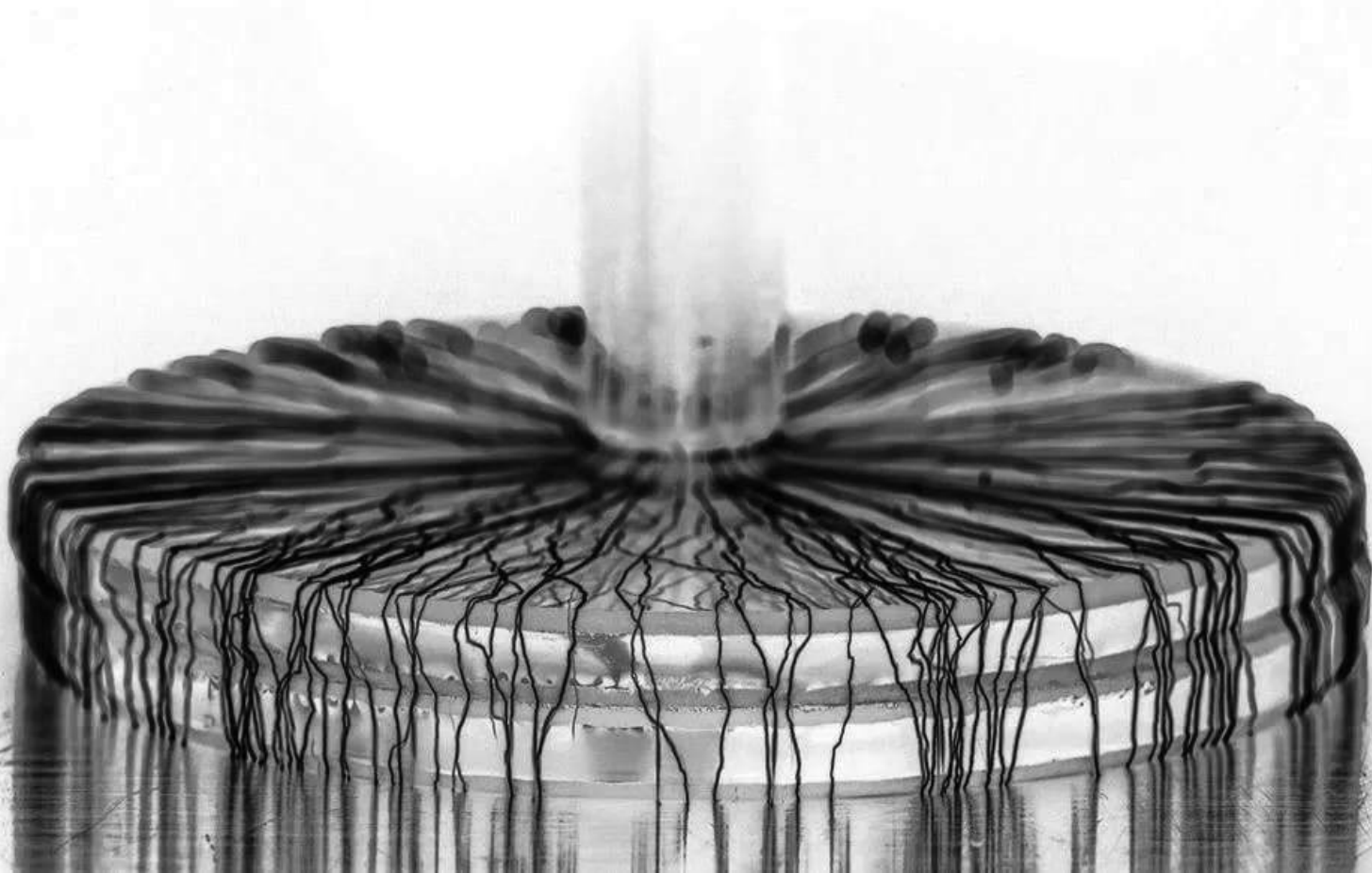
1. Тухбатова Э.Р., Мусин А.А., Юлмухаметова Р.Р., Ковалева Л.А. Исследование влияния тепловой конвекции на процесс разрушения водонефтяной эмульсии при СВЧ воздействии // Вестник Башкирского университета // 2017, Т. 22, №4, С. 930–934.
2. Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкий. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ МК-9398.2016.1 и Российского научного фонда (проект №19-11-00298)



СЕКЦИЯ 9

Электрофизические явления в газовых и жидких средах



Барышников А.С., Басаргин И.В., Безверхний Н.О., Бобашев С.В., Монахов Н.А.,
Попов П.А., Сахаров В.А., Чистякова М.В.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН,
194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 26

Для диагностики низкотемпературной плазмы широко используется двойной электрический зонд, представляющий собой два электрода, между которыми приложено постоянное напряжение [1–2]. Этот инструмент является простым и удобным в исследованиях плазмы неограниченного объема, например, ионосферы [4] или безэлектродных высокочастотных разрядов в камерах с изолирующими стенками [4]. В этом случае измерительная система находится под плавающим потенциалом относительно плазмы, что позволяет использовать двойной зонд для измерений в нестационарных процессах. Еще одно преимущество заключается в малости возмущений, вносимых в плазму, поскольку ток в его цепи всегда ограничен по величине ионным током насыщения.

Измерения двойным зондом в плазме электродного разряда осложняются наличием гальванической связи между зондом и электродами разряда. В стационарных или медленно меняющихся процессах измерения не вызывают особых трудностей. Однако при быстром ($t \sim 1\text{--}10 \mu\text{s}$) изменении потенциала плазмы результаты измерений могут быть искажены переходным процессом в измерительной цепи. С данной проблемой авторы столкнулись при изучении взаимодействия поперечного тлеющего разряда с ударной волной [5–8]. Особенностью этих экспериментов являлось наличие изменений тока двойного зонда до прихода ударной волны в точку измерения. Газодинамическое возмущение проводящей среды сопровождается изменением потенциала пространства, что при наличии емкости зонда относительно опорного электрода разрядного промежутка вызывает дополнительный ток в измерительной цепи. Таким образом, в нестационарном процессе ток зонда является суммой ионного тока, определяемого источником напряжения в измерительной цепи, и тока перезаряда емкости, направление которого зависит от направления изменения потенциала плазмы. Поиск способа коррекции результатов измерений в таких условиях становится важным фактором при анализе данных процессов.

Эксперименты выполнялись на плазмодинамической установке ФТИ им. А.Ф. Иоффе, на которой был выполнен ряд работ по исследованию взаимодействия ударных волн с неравновесной плазмой. Тлеющий разряд создавался в воздушной среде при давлении 4 кПа. Видимая часть разряда имела форму тела вращения с переменным радиусом. Температура газа в центре разряда составляла $\sim 1300 \text{ K}$, электронов $\sim 12000 \text{ K}$, степень ионизации не превышала 10–6. На боковой стенке рабочей камеры был расположен выходной торец электроразрядной ударной трубы. Скорость ударной волны при входе плазму равнялась 1000 м/с , что соответствует числу Маха $M=3$.

Динамика параметров плазмы в нестационарном газодинамическом процессе была исследована с помощью двойного электрического зонда, вводимого в

плазму навстречу ударной волне. Зонд состоял из двух параллельных платиновых электродов диаметром 0.5 мм и длиной 10 мм, разнесенных в горизонтальной плоскости на расстояние 8 мм. Электроды зонда были ориентированы параллельно оси разряда. Характерное время изменения параметров плазмы при движении ударной волны не превышало 1 мкс, поэтому качественный анализ изменения параметров плазмы разряда осуществлялся без регистрации ВАХ двойного зонда. На электроды зонда подавалось постоянное напряжение 40 В, что обеспечивало режим насыщения ионного тока двойного зонда. В этом случае зондовый ток определялся температурой электронов и концентрацией ионов в окрестности отрицательного электрода зонда.

Эксперименты показали, что в процессе движения ударной волны по плазме разряда сигнал двойного зонда начинает изменяться задолго до прихода ударной волны в точку измерения, причем это изменение начинается одновременно во всем объеме плазмы. Анализ особенностей методики зондовых измерений в нестационарном газодинамическом процессе показывает, что причиной изменения зондового тока до прихода ударной волны является изменение электрического поля в разрядном промежутке. В данной работе предложена методика коррекции результатов измерений двойным зондом в нестационарном процессе в электродном газовом разряде. Данный подход к обработке измерений предполагает независимость ионного тока и тока перезаряда емкости двойного зонда. Методика обработки сигналов двойного зонда заключается в совместной обработке двух сигналов, полученных в отдельных опытах с различной площадью поверхности отрицательного электрода двойного зонда и прочих равных условиях. Анализ скорректированных с помощью этой методики измерений показал отсутствие изменений концентрации заряженных частиц в плазме до прихода ударной волны в точку измерения. Изменение потенциала пространства начинается при входе ударной волны в видимую область тлеющего разряда.

Список литературы:

1. Каган В.М., Перель В.И. // УФН. 1963. Т. 81. № 3. С. 409–452.
2. Демидов В.И., Колоколов Н.Б., Кудрявцев А.А. Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1996. 235 с.
3. Альперт Я.Л., Гуревич А.В., Питаевский Л.П. Искусственные спутники в разреженной плазме. М.: Наука, 1964. 384 с.
4. Naz M.Y., Ghaffar A., Rehman N.U., et al. // Progress in Electromagnetics Research. 2011. V. 114. P.113–128.
5. Барышников А.С., Басаргин И.В., Бобашев С.В., и др. // ИФЖ. 2016. Т. 89. № 3. С. 555–558.
6. Барышников А.С., Басаргин И.В., Безверхний Н.О., и др. // ЖТФ. 2018. Т. 88. № 2. С. 180–182.
7. Baryshnikov A.S., Basargin I.V., Bezverkhni N.O., et al. // J. Phys.: Conf.Ser. 2018. V. 1112. N 1. Art. No. 012007.
8. Baryshnikov A.S., Basargin I.V., Bezverkhni N.O., et al. // AIAA Journal. 2018. V. 56. No 9. P. 3782–3784.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В ТЕЧЕНИИ ГАЗА С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ПРЕПЯТСТВИЕМ НА СТЕНКЕ КАНАЛА

Знаменская И.А., Иванов И.Э., Татаренкова Д.И.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

На основе экспериментальных исследований проведен анализ перераспределения энергетических потоков плазмы импульсного объемного разряда субмикросекундной длительности при его инициировании в газодинамическом прямоугольном канале с препятствием – прямоугольным выступом (параллелепипедом) на стенке канала.

Установка представляет собой диафрагменную ударную трубу с прямоугольным каналом внутреннего сечения 24×48 мм², в камеру низкого давления которой встроена разрядная камера того же сечения. Через боковые стенки камеры (кварцевые стекла) ведется панорамная визуализация плазмотинамического процесса (в частности, многокурсно регистрируется свечение разряда в потоке и послесвечение) и теневая высокоскоростная визуализация газодинамического потока с разрывами. Начальное давление воздуха 20–50 торр. В разрядной камере в заданный момент времени, синхронизованный с прохождением фронта ударной волны по разрядному объему, инициировался импульсный объемный разряд.

Комбинированный разряд – импульсный объемный разряд с предыонизацией ультрафиолетовым излучением от плазменных листов, расположенных на верхней и нижней стенках рабочей (разрядной) камеры ударной трубы. Импульс напряжения амплитудой 25 кВ инициировал развитие скользящих по поверхности диэлектрика разрядов наносекундной длительности, образующих плазменные листы, которые излучают в ультрафиолетовом диапазоне и обеспечивают предыонизацию объема газа.

Исследованы различные режимы обтекания препятствия потоком воздуха за ударными волнами с числами Маха от 2.1 до 4.3 после ее прохождения (дифракции) через препятствие. Экспериментально измеренная скорость спутного потока за ударной волной уменьшалась с 700–800 м/с до 300–200 м/с к 6–7 миллисекунде.

Показано изменение поля свечения (локализации разряда около ступеньки) при его инициировании последовательно в сверхзвуковом, транзвуковом, дозвуковом потоке как в ламинарном, так и в турбулентном течении. Излучение плазмы определяется локальным значением приведенного электрического поля E/N (E – напряженность электрического поля, N – концентрация молекул). Разряд в потоке локализуется в виде прямолинейного короткоживущего плазменного образования длиной от 30 мм диаметром 1–2 мм вдоль наветренной и (или) подветренной стороны параллелепипеда на различном расстоянии от стенки и от уступа (см. рис.1). Время свечения

плазмы составляет 200–1000 нс при длительности тока разряда 200–300 нс.

Показано, что визуализированная локализация плазмы разряда в потоке с газодинамическими неоднородностями и разрывами коррелируют с параметрами и формой осциллограмм тока комбинированного разряда.

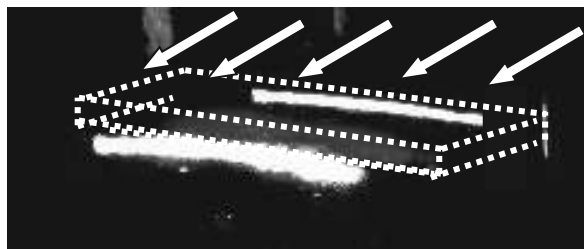


Рис.1. Поле свечения импульсного комбинированного разряда около в потоке около прямоугольного препятствия на нижней стенке канала.

Проведено численное 2D моделирование исследуемого нестационарного квазидвумерного течения газа (дифракция ударной волны на прямоугольном препятствии и установление течения в прямоугольном канале) на основе уравнений Навье-Стокса. Результаты численной визуализации полей плотности и скорости сравнивались с полученными экспериментальными полями свечения разряда в поле течения. Проанализирована динамика полей плотности в зоне уступа. Показано, что изменение энергетических потоков плазмы разряда сложным образом связано с изменением структуры локальных зон отрыва потока при обтекании наветренной и подветренной стороны прямоугольного препятствия. Рассмотрены возможности импульсного воздействия на обтекание уступа на основе явления самолокализации разряда в зоны отрыва в наветренной и подветренной зоне на основе полученных данных и численного моделирования.

Список литературы:

1. Булат П.В., Волков К.Н. Моделирование сверхзвукового течения в канале со ступенькой на неструктурированных сетках при помощи WENO-схем // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 4. С. 848–855.
2. Импульсный объемный разряд с предыонизацией в двумерном газодинамическом потоке / И. А. Знаменская, И. Э. Иванов, И. А. Крюков, Т. А. Кули-Заде // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2002. – Т. 122, № 6. – С. 1198–2006.

Работа выполнена при поддержке
гранта РФФИ № 18-19-00672

ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ РАВНОВЕСНЫХ ФОРМ СТРУИ ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ ВО ВНЕШНЕМ ПОПЕРЕЧНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Зубарева О.В.¹, Зубарев Н.М.^{1,2}

¹ Институт электрофизики УрО РАН,
620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119333, Россия, Москва, Ленинский пр., 53

Рассматривается незаряженная цилиндрическая струя проводящей жидкости, движущаяся между парой плоских электродов, находящихся на расстоянии D друг от друга. В случае отсутствия электрического поля единственной возможной равновесной конфигурацией струи является струя круглого сечения (обозначим ее радиус за R_0). При наличии разности потенциалов U между электродами струя деформируется под действием электростатических сил: ее поперечное сечение растягивается вдоль силовых линий поля. При этом капиллярные силы играют стабилизирующую роль. При взаимной компенсации капиллярных и электростатических может возникнуть новая равновесная конфигурация струи [1]. Сложность отыскания нового равновесного состояния системы связана с необходимостью нахождения распределения электрического поля вокруг струи, форма которой неизвестна и определяется существенно нелинейным условием баланса электростатических и капиллярных сил. Как оказывается, в достаточно сильном поле баланс сил становится невозможным, и струя расщепляется на две отдельные. Важность подобного анализа обусловлена возможностью контролируемого расщепления струй приложенным поперечным электрическим полем. Так, например, в работе [2] обсуждалась возможность практического использования этого явления для производства полимерных волокон.

К настоящему времени известно только два точных частных решения рассматриваемой электростатической задачи. Ее нуль-параметрическое решение было найдено в работе [3], в которой рассматривалась близкая с математической точки зрения задача о форме двумерного газового пузыря, движущегося в идеальной бесконечной жидкости. Ее решение задается следующей формулой:

$$z = \sqrt{\frac{243}{134}} R_0 \left(\exp(i\tau) - \frac{2}{3} \exp(-i\tau) - \frac{1}{27} \exp(-3i\tau) \right),$$

Где $z = x + iy$, а τ – параметр, меняющийся в интервале от 0 до 2π . Это решение определяет равновесную конфигурацию струи в однородном внешнем электрическом поле при бесконечном расстоянии между электродами в частном случае, когда давление внутри жидкости совпадает внешним давлением (разность давлений $\Delta P = 0$).

Другое точное решение было получено нами в статье [1] с использованием предположения о том, что характер связи между величиной напряженности поля и углом его наклона на свободной поверхности жидкости не меняется при ее деформации. Сходное предположение применялось в работе [4] для вычисления равновесной формы периодической системы

жидкометаллических колонн во внешнем высокочастотном магнитном поле. Форма свободной поверхности задается выражением

$$y = \pm \frac{R_0}{p\sqrt{A}} \arctg \sqrt{A - (A+1) \operatorname{th}^2 \left(\frac{Bpx}{R_0} \right)}.$$

Здесь $B = \sqrt{A(A+1)}$, $p = \sqrt{\ln(A+1)/\sqrt{AB}}$, а параметр решения $A = \epsilon_0 E_{\max}^2 / (2\Delta P)$ определяется максимальным значением электрического поля на поверхности струи $E_{\max}$, ϵ_0 – электрическая постоянная. Видно, что для фиксированного радиуса R_0 решение зависит от единственного управляющего параметра A .

Общее решение задачи зависит от двух параметров – безразмерного межэлектродного расстояния D/R_0 и электрического числа Бонда (последнее характеризует приложенную разность потенциалов). Нами найдена аппроксимация для этого решения на основе деформации приведенного выше однопараметрического решения. С ее помощью определена область значений параметров, в которой решения для равновесных конфигураций струи существуют. Также определены условия, при которых задача не имеет решений, и, следовательно, струя распадается. Сделаны оценки для свободной энергии струи в электрическом поле. Как оказалось, при одинаковых условиях (одинаковых значениях управляющих параметров) могут сосуществовать решения с разными значениями энергии. Следует ожидать, что устойчивым будет решение с меньшей энергией, которому соответствует меньшая деформация поверхности. Полученные результаты согласуются с предельным случаем бесконечного межэлектродного расстояния [5].

Список литературы:

1. Волков Н.Б., Зубарев Н.М., Зубарева О.В. Точные решения задачи о форме незаряженной струи проводящей жидкости в поперечном электрическом поле // ЖЭТФ. 2016. Т. 149. № 5. С. 1096–1101.
2. Paruchuri S., Brenner M.P. Splitting of a liquid jet // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. art. no. 134502.
3. McLeod E.B. The explicit solution of a free boundary problem involving surface tension // J. Rat. Mech. Anal. 1955. V. 4. P. 557–567.
4. Shercliff J.A. Magnetic shaping of molten-metal columns // Proc. R. Soc. London, Ser. A. 1981. V. 375. P. 455–473.
5. Behjatian A., Esmaceli A. Точное решение задачи о равновесной конфигурации заряженной поверхности жидкого металла // J. Electrostat. 2015. V. 75. P. 5–13.

Работа поддержана РФФИ
(гранты № 19-08-00098 и № 17-08-00430)

ДИНАМИКА ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ: МЕТОД РЕШЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬЦМАНА

Куперштох А.Л., Медведев Д.А.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

Для моделирования частичных разрядов [1] в пузырьках, находящихся в жидком диэлектрике на поверхности электрода, необходимо кроме расчета распределения электрических полей описывать изменение формы пузырьков под действием электрического поля. Похожая задача о поведении пузырьков возникает при моделировании кипения жидкости при наличии электрического поля. Такая задача моделировалась в двумерном случае в работе [2].

В данной работе разработана трехмерная компьютерная электрогидродинамическая модель динамики паровых пузырьков с учетом поверхностного натяжения и процессов испарения на границах раздела фаз жидкость-пар. На данном этапе исследований расчеты проводились без учета перераспределения зарядов в пузырьках при прохождении тока в процессе частичных разрядов.

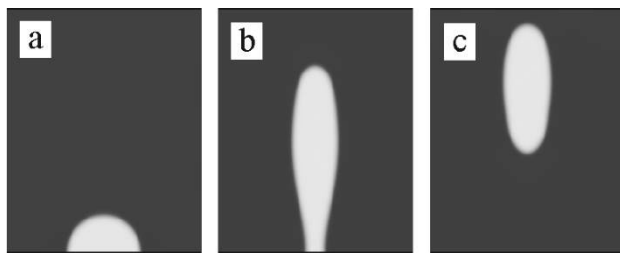


Рис. 1. Динамика парового пузырька в электрическом поле. $\mathcal{E}=2,3$. Размеры расчетной области $256 \times 256 \times 320$. $t=0$ (a), 4600 (b), 8600 (c).

Для моделирования динамики жидкого диэлектрика с пузырьками использовался вариант метода решеточных уравнений Больцмана (LBM), с учетом фазовых переходов жидкость-пар, предложенный авторами в [3,4]. С этой целью для флюида использовалось уравнение состояния Ван-дер-Ваальса в приведенных переменных. Для учета действия объемных электрических сил вместе с гидродинамической задачей необходимо одновременно решать задачу о распределении электрического поля в неоднородном диэлектрике. Расчет потенциала электрического поля φ между плоскими параллельными электродами производился на каждом шаге по времени методом итераций по конечно-разностной схеме с центральной аппроксимацией вторых производных. При этом учитывалось изменение распределения диэлектрической проницаемости диэлектрика $\mathcal{E}$ в пространстве и во времени. В перпендикулярном полю направлении использовались периодические граничные условия. Электрическое поле затем вычислялось по формуле $\mathbf{E} = -\nabla\varphi$. Для гидродинамической задачи на электродах выполнялись условия прилипания. Контактный угол принимался равным 90° .

Расчеты распараллеливались на двух многопроцессорных графических картах Titan-Xp (3840 ядер и

12 ГБ быстрой внутренней памяти у каждой) с использованием технологии CUDA (Compute Unified Device Architecture).

На рис. 1 показана динамика первоначально полусферического пузырька радиуса $R_0 = 50$ узлов сетки, находящегося на поверхности электрода, под действием электрического поля. Увеличение объема пузырька происходит за счет испарения жидкости в пузырьке. После удлинения пузырька может происходить его отрыв от поверхности электрода. Затем удлиненный электрическим полем пузырек примерно эллипсоидальной формы всплывает из-за наличия поля тяжести. Значение числа Бонда $Bo=0,67$. Вязкость жидкости соответствовала значению числа Онезорге 0,04. Электрическое число Бонда $Bo_E=27$.

На рис. 2 показана динамика двух пузырьков разного размера ($R_0 = 40$ и 50) первоначально полусферической формы, находящихся на поверхности нижнего электрода. Поскольку процесс происходит в замкнутом объеме, а жидкость почти несжимаема, то происходит увеличение объема большого пузырька, на который электростатические силы действуют сильнее, за счет уменьшения объема малого. Через некоторое время маленький пузырек полностью растворяется путем конденсации пара на поверхности. Этому способствует повышенное давление внутри пузырька из-за поверхностного натяжения и сдвиг равновесия фаз из-за отрицательной кривизны. Число Онезорге=0,14. Электрическое число Бонда=47.

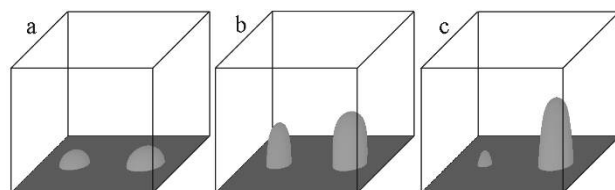


Рис. 2. Динамика двух паровых пузырьков разного размера в электрическом поле. $\mathcal{E}=2,3$. Размеры расчетной области $400 \times 400 \times 352$. $t=0$ (a), 2400 (b), 3600 (c).

Список литературы:

1. Kupershtokh A.L., Karpov D.I. «Relay-race» mechanism of partial discharges in a long chain of cavities for stochastic nature of process // J. Electrostatics. 2018. V. 94. P. 8–13.
2. Feng Y., Li H., Guo K., Lei X., Zhao J. Numerical study on saturated pool boiling heat transfer in presence of a uniform electric field using lattice Boltzmann method // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2019. V. 135. 885–896.
3. Kupershtokh A.L., Medvedev D.A., Karpov D.I. On equations of state in a lattice Boltzmann method // Computers and Mathematics with Applications. 2009. V. 58. No. 5. P. 965–974.
4. Kupershtokh A.L. Criterion of numerical instability of liquid state in LBE simulations // Computers and Mathematics with Applications, 2010. V. 59. No. 7. P. 2236–2245.

Работа поддержана РНФ (грант № 16-19-10229)

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДНОЙ ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ СРЕДНИХ ДАВЛЕНИЯХ

Медведев Р.Н.¹, Савенко Р.А.^{1,2}, Чуркин Д.С.^{2,3}

¹Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

²Новосибирский государственный университет
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³Институт лазерной физики СО РАН
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15Б

Водяной пар является относительно дешевым сырьем, в то же время при диссоциации в разряде образуются атомы кислорода и гидроксил ОН, которые обладают большой химической активностью. Это делает водную плазму привлекательной в таких приложениях, как обеззараживание, окисление, травление. При этом присутствие в плазме атомарного водорода позволяет относительно легко оценивать температуру плазмы по спектрам Бальмеровской серии водорода. Однако, из-за большой теплопроводности водорода [1] и затрат энергии на диссоциацию молекул воды, сложно получить достаточно нагретую плазму на уровне инертных газов (например, аргон) [2].

Несмотря на наличие некоторого количества научных работ по изучению водной индуктивно-связанной плазмы (ИСП), на сегодняшний день нет соответствующих отработанных методик ее диагностики, что затрудняет создание установок по использованию водной ИСП в промышленных и аналитических приложениях. Поэтому задача исследований энергетических и спектральных характеристик и поиск закономерностей, позволяющих проводить оценки параметров водной ИСП, остается актуальной.

В проведенных экспериментах индуктивный разряд возбуждался в кварцевой трубке диаметром $D=20\text{--}45$ мм медным индуктором, имеющим $N=1\text{--}5$ витков. На индуктор подавался ток от ВЧ источника CESAR 2710 с частотой 27,12 МГц. Выделяемая на нагрузке мощность составляла 600 ± 30 Вт. Трубку подключалась с одной стороны к вакуумному насосу, а с другой – к сосуду с дистиллированной водой, имеющему дозирующий клапан.

Для измерения пространственного распределения температур использовалась трубка с плоским торцом, к которому подводился световод спектрометра. Для регистрации светового потока из узкого слоя плазмы на световод одевалась металлическая трубка длиной 10 см и диаметром 3 мм. Спектр разряда регистрировался при помощи спектрометра Solar Systems S-150.

Давление p в разрядной трубке контролировалось вакуумметром Testo 552. Время горения разряда составляло 0,1–0,5 сек.

На рис. 1 показана экспериментальная зависимость температур от расстояния от центра трубки, посчитанных по относительной интенсивности линий Бальмеровской серии водорода.

Видно, что температуры не совпадают – плазма не находится в термодинамическом равновесии. Это может быть результатом самопоглощения линии H_α , которое проявляется в плазме, состоящей преимущественно из водорода [3], а также перенаселенностью 3-го энергетического уровня водорода, что приводит

к увеличению интенсивности линии H_β . Таким образом, реальная температура атомов находится между значениями $T_{\gamma\beta}$ и $T_{\gamma\alpha}$ (1500–2500 К). Видно, что она гораздо меньше температуры для аргонной плазмы при одинаковой вводимой мощности, что объясняется большой теплопроводностью водорода и потерями энергии на диссоциацию молекул воды [1].

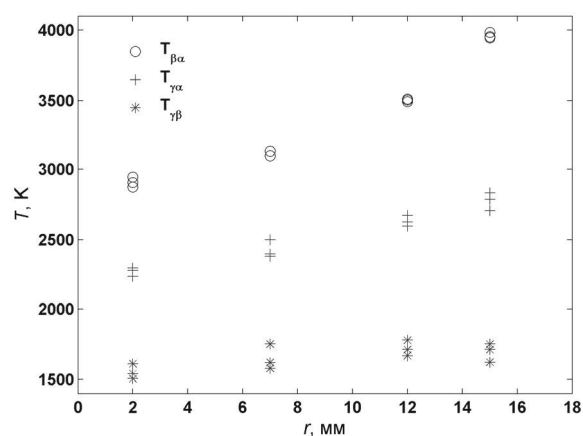


Рис. 1. Температуры, посчитанные по относительной интенсивности линий бальмеровской серии водорода на разных расстояниях от оси разрядной трубки. $p=1$ мбар, $D=40$ мм, $N=1$.

Видно, что разность температур $T_{\beta\alpha}$, $T_{\gamma\alpha}$ и $T_{\gamma\beta}$ различных возбужденных атомов плазмы увеличивается при увеличении r . Из этого можно сделать вывод, что разница кинетических энергий возрастает с ростом r .

При помощи последовательной регистрации спектра с экспозицией 50 мс была измерена динамика спектральных линий во времени. Время выхода на стационарное значение для линии H_α составило ~100 мс, для линии H_γ ~200 мс. Можно сделать вывод, что время нагрева в данном случае составляет около 200 мс.

Список литературы:

1. Tang Y.Q., Trassy C. Inductively coupled plasma: the role of water in axial excitation temperatures // Spectrochimica Acta. 1986. V. 41B. N 1/2. P. 143–150.
2. Kregar Z. et al. Space and time resolved optical emission spectroscopy characterization of inductively coupled RF water vapour plasma // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. N 14. 145201.
3. Torres J. et al. Multiple diagnostics in a high-pressure hydrogen microwave plasma torch // Applied physics letters. 2010. V. 96. N 5. 051501.

Работа поддержана РФФИ (грант № 16-38-60039)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ЧАСТИЧНОГО
РАЗРЯДА В ГЕЛИЕВОМ ПУЗЫРЬКЕ****Мередова М.Б.^{1,2}, Карпов Д.И.¹**¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Регистрация частичных разрядов (ЧР) в изоляции считается одним из современных и весьма информативных методов оценки состояния высоковольтного оборудования. Под частичным разрядом в жидком диэлектрике обычно понимают две формы разряда. При воздействии высокого напряжения в жидкости развиваются стримеры, которые не приводят к пробойу изоляции (незавершенный разряд), или происходит электрический разряд в газовом пузырьке. ЧР сопровождается импульсом тока во внешней цепи, характеристики которого определяются пространственной динамикой заряда в стримере или внутри пузырька.

В настоящей работе рассмотрены особенности развития ЧР в газовом пузырьке, заполненном гелием, в жидкости.

При наличии начальной ионизации под действием внешнего поля в газе развивается электронная лавина. На сегодняшний день неизвестно, захватывает ли развитие лавины весь пузырек или в процессе участвует только часть пузырька. Выполнено моделирование частичного разряда в сферическом пузырьке, центральная часть которого в форме цилиндра проводит электрический ток. Использовано приближение постоянной проводимости вещества во время ЧР. Показано, что регистрируемые характеристики ЧР (в том числе «кажущийся» заряд) зависят от пространственной конфигурации разряда в пузырьке. В связи с этим оказывается важным более детальное исследование лавинных процессов в газовом пузырьке в диэлектрической изоляции при ЧР.

Исследовано развитие лавин в газовой полости и возможность преобразования лавины в стример в пузырьках размером ~ 1 мм. В модели непосредственно рассчитывались процессы зарядообразования вследствие ионизации газа. Также явно рассчитывались процессы переноса зарядов в электрическом поле за счет подвижности и диффузии. Выполнялся расчет электрических полей на каждом временном шаге с учетом изменения текущих концентраций электронов и ионов в пузырьке. При этом диэлектрическая проницаемость окружающей жидкости была равна 2.2

(трансформаторное масло), а газа в пузырьке – 1. В экспериментах наблюдается деформация диэлектрического газового пузырька в жидкости под действием электрострикционных сил. Поэтому в расчетах форма пузырька была выбрана в виде эллипсоида вращения. В качестве граничных условий были приняты значения потенциала $\varphi = 0$ на нижнем электроде и $\varphi = V_0$ на верхнем электроде. Для расчета динамики зарядов использовались уравнения переноса для концентраций отрицательных и положительных зарядов с учетом процессов ударной ионизации, рекомбинации и диффузии. Для нахождения соответствующих коэффициентов была проведена аппроксимация экспериментальных данных [1–3] в широком диапазоне напряженностей электрического поля. Уравнения модели взяты из работы [4].

Расчеты выполнялись с использованием графических ускорителей. С применением технологии CUDA был разработан и реализован параллельный алгоритм.

Были выполнены расчеты развития лавин из первичной затравки в двумерной постановке. Также реализована квазитрехмерная постановка с цилиндрической симметрией и выполнены расчеты развития лавин. Показано, что в пузырьке происходит переход лавинного механизма в стримерный. Рассчитаны распределения концентраций заряженных частиц в пузырьке, напряженность электрического поля при развитии частичного разряда.

Список литературы:

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда М.: Наука 1992. 536 с.
2. Смирнов Б.М. Свойства газоразрядной плазмы СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 363 с.
3. Смирнов Б.М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М: Атомиздат, 1974. 456 с.
4. Курбанисмаилов В.С., Омаров О.А., Рагимханов Г.Б., Терешонок Д.В. Особенности формирования и развития ионизационных фронтов в предварительно ионизированной газовой среде // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 18. С. 73–81.

Работа поддержана РНФ (грант № 16-19-10229)

ВЛИЯНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ ЭФФЕКТОВ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОЙ СРЕДЕ

Перегудин С.И.¹, Перегудина Э.С.², Холодова С.Е.³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9

² Санкт-Петербургский горный университет,
199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2

³ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49

В представленном исследовании изучаются динамические процессы во вращающемся слое электропроводящей несжимаемой жидкости, которая находится в магнитном поле, параллельном нормали к граничным поверхностям, при этом в уравнении индукции магнитного поля производится учет не только конвективных членов, но и диффузионных.

При решении рассматриваемой задачи, как задачи геофизической гидродинамики, возникает необходимость построения приближенных вариантов основных магнитогидродинамических уравнений и строгого дальнейшего математического анализа этих приближенных уравнений. При этом вводимые приближения необходимы для продвижения в решении поставленных задач. С этой целью, вводя в рассмотрение характерные масштабы изменения переменных в исходных уравнениях и оценивая порядки величин членов, входящих в уравнения, удастся выделить главные и второстепенные члены, упростить уравнения и построить модель исследуемого процесса.

С помощью введения вспомогательных функций система уравнений в частных производных редуцируется к одному скалярному уравнению, что может позволить сделать вывод об аналитической структуре магнитогидродинамических характеристик.

Представленные исследования позволяют судить о том, что генерация магнитного поля в электропроводящей жидкости является следствием неустойчивости, характеризуемой соответствующими соотношениями между силами гравитации, Кориолиса, магнитной силой и особенностями топографии рельефа.

Вопросам о крупномасштабных движениях электропроводящей жидкости посвящено множество работ. Наиболее известные из них [1, 2]. Во всех этих работах рассматривается модель, построенная в приближении быстрого вращения, вследствие чего в уравнении движения пренебрегается силой инерции.

В работах [3, 4] проводилось исследование крупномасштабных движений электропроводящей вязкой жидкости в слое, заключенном между двумя плоскостями без учета инерционной силы, причем вязкие силы привлекались искусственно.

В статьях [5, 6] проведено построение математической модели динамики пространственных крупномасштабных движений во вращающемся слое идеальной электропроводящей несжимаемой жидкости переменной глубины с учетом диссипативных эффектов с внешним магнитным полем, параллельным оси вращения слоя. Произведена редукция соответствующей системы уравнений в частных производных к одному скалярному уравнению. Доказано

утверждение об аналитическом представлении решения о возмущениях в жидком слое, что позволяет в явном виде построить решение, описывающее волны как малой, так и конечной амплитуды в бесконечно протяженном по горизонтали прямолинейном слое и узком длинном канале.

В представленном исследовании произведен учет диссипативных эффектов, а именно, изучено влияние диффузии магнитного поля на его генерацию в случае, когда вектор внешнего магнитного поля параллелен нормальному вектору к граничной поверхности жидкого слоя.

Полученные результаты и методы могут быть использованы для расчета силового воздействия волн с учетом соответствующих эффектов, для определения волнового режима акваторий, в исследованиях специалистов по гидродинамике, магнитной гидродинамике, морской гидротехнике и при строительстве морских гидротехнических сооружений на стадии проектирования, а также при решении задач прикладной математики и математической физики. Представленные аналитические решения позволяют проводить сравнение и оценку эффективности различных асимптотических и приближенных методов, в частности, численных.

Использование современных интегрированных сред разработки программных продуктов, а также современных средств компьютерной алгебры, позволяющих работать с математическими операциями как с символьными объектами, может позволить получить графическую визуализацию представленных аналитических решений с дальнейшим качественным анализом для принятия соответствующих решений.

Список литературы:

1. Busse F.H. Generation of planetary by convection // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1976. V. 12. P. 350–358.
2. Zhang K.K., Busse F.H. Generation of magnetic fields by convection in a rotating spherical fluid shell of infinite Prandtl number // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. V. 59. P. 208–222.
3. Fearn D.R. Thermal and magnetically driven instabilities in a rapidly rotating fluid sphere // *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.* 1979. V. 14. P. 103–126.
4. Fearn D.R., Proctor M.R. Hydromagnetic waves in a differentially rotating sphere // *J. Fluid Mech.* 1983. V. 128. P. 1–20.
5. Peregudin S.I., Kholodova S.E. Waves in a rotating layer of an ideal electrically conducting incompressible fluid with allowance effects of diffusion of magnetic field // *20th International Workshop on BEAM Dynamics and Optimization*, 2014, Saint-Petersburg, pp. 133–134.
6. Peregudin S.I., Kholodova S.E. Waves propagation in an infinite horizontal layer and a long narrow channel // *2015 International Conference on Mechanics – Seventh Polyakhov's Reading*; Saint Petersburg St. Petersburg State University; Category number CFP15A24-ART; Code 112290.

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФфуЗИИ ПЛОТНОСТИ НА МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СФЕРИЧЕСКОМ СЛОЕ

Перегудин С.И.¹, Перегудина Э.С.², Холодова С.Е.³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9

² Санкт-Петербургский горный университет,
199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2

³ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49

Проводятся исследования трехмерных крупномасштабных движений невязкой, несжимаемой неоднородной, идеально проводящей жидкости, находящейся в поле магнитной силы и силы Кориолиса, с учетом сферической топографии ограничивающих поверхностей.

Результаты исследования могут быть использованы в геофизике и астрофизике, в частности, при изучении динамических процессов, происходящих в жидком ядре Земли и недрах звезд, кроме того могут быть применены при определении гидродинамических характеристик жидкой среды, а также для оценки параметров источника волновых возмущений по электромагнитному полю, индуцированному соответствующим гидродинамическим волнением. Кроме того, представленные результаты могут быть полезны при изучении магнитогидродинамических процессов в технических устройствах и технологических процессах с целью развития исследования приоритетных энергоносителей.

С развитием вычислительных технологий появилась возможность непосредственного численного решения задач кинематического динамо для модельных течений, в том числе, и в сфере [1–3]. Во всех этих исследованиях возникает проблема, которая состоит в том, что удастся произвести расчеты лишь для магнитных чисел Рейнольдса, меньших практических потребностей астрофизики и геофизики.

Кроме того, при малых значениях числа Экмана у границ жидкости возникают пограничные слои, которые не могут быть достаточно точно разрешены численно, и которые необходимо анализировать с применением аналитических методов.

В статье [4] представлено аналитическое решение, позволяющее рельефа граничных поверхностей на магнитогидродинамические характеристики волнового процесса в жидком слое. В статье [5] проведена редукция нелинейной системы уравнений в частных производных, моделирующей возмущения в идеальной электропроводной вращающейся жидкости, с учетом инерционных сил, сил тяжести, Кориолиса, Лоренца, а также имеющихся неоднородностей плотности, к скалярному линейному уравнению и сделан вывод об аналитическом представлении решения задачи о малых возмущениях в рассматриваемой жидкости. Анализ полученных решений позволил установить факт существования установившегося режима колебаний при больших значениях времени, что служит подтверждением важной роли стратификации плотности жидкого слоя, определяющем в целом ряде

случаев его основную динамику, как важный фактор эволюции рассматриваемой модели.

Согласно результатам исследований, изложенным в [6], в динамику магнитного поля существенный вклад вносит движение представленной жидкости непосредственно в тонком, примыкающем к границе, слое.

Представляют интерес крупномасштабные движения, горизонтальный масштаб которых сравним с радиусом слоя, а именно распределение плотности и всех магнитогидродинамических величин, возникающих в результате термодинамических изменений у его границы.

В представленном исследовании рассматривается модель с переменной стратификацией без использования магнитострофического приближения и приближения Буссинеска.

Если турбулентная диффузия плотности пренебрежимо мала, то вертикальная компонента скорости при удалении от внешней границы стремится к нулю, следовательно, основная структура гидродинамических полей определяется, также, как и в отсутствие диссипации, фактическая роль которой – создание подъема жидкости от нижней границы, в отличие от рассмотренной ранее в [7] нестационарной модели, где вертикальная компонента скорости жидкой частицы далеко от внешней границы слоя явно определяются не только параметром интенсивности турбулентной диффузии плотности, но и распределением функции поверхностной температуры, и диффузия плотности влияет на все магнитогидродинамические характеристики жидкого объема.

Список литературы:

1. Glatzmaier G.A., Roberts P.H. Rotation and magnetism of Earth's inner core // *Science*. 1996. V. 274. P. 1887–1891.
2. Glatzmaier G.A., Roberts P.H. Simulating the geodynamo // *Contemporary physics*. 1997. V. 38. P. 269–288.
3. Jones C.A. Convection-driven geodynamo models // *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* 2000. V. A358. P. 873–897.
4. Холодова С.Е. Квазигеострофические движения во вращающемся слое электропроводной жидкости // *Прикладная механика и техническая физика*. 2009. Т. 50. № 1, С. 30–41.
5. Холодова С.Е. Динамика вращающегося слоя идеальной электропроводной несжимаемой жидкости // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2008. Т. 48. № 5. С. 882–898.
6. Холодова С.Е. Математическое моделирование крупномасштабных движений стратифицированной электропроводной жидкости в сферическом слое // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета*. 2009. Сер. 10. Вып. 1. С. 118–133.
7. Peregudin S. I., Peregudina E. S. Kholodova S. E. Dynamical effects of a magnetic field versus the nonlinear wave regime of a rotating layer of liquid // *Вычислительные технологии*. 2018. Т. 1. Ч. 2. С. 177–183.

ОСОБЕННОСТИ ДИФFUЗНОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В СЛУЧАЕ УНИПОЛЯРНОГО ИМПУЛЬСА НАПРЯЖЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ 500 НАНОСЕКУНД**Ренев М.Е., Стишков Ю.К., Сафронова Ю.Ф.**Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, Санкт-Петербург, Менделеевская линия, 2

В работе рассматривается диффузный барьерный разряд, вызванный 500 нс импульсом напряжения прямоугольной формы с амплитудой 12 кВ, в системе электродов плоскость+воздушный промежуток – твердый диэлектрик-плоскость. С помощью компьютерного моделирования рассчитывается диффузный барьерный разряд в одномерном приближении. Разряд описывается как плоский одномерный стример. Физические процессы, описывающие барьерный разряд, и зависимости, их характеризующие, продолжают вызывать дискуссию [1-4]. Один из таких параметров – автоэмиссия электронов с катода, оказывающая первостепенное влияние на замыкание положительной головки стримера на электроде. В работе рассматривается автоэмиссия с квадратичной зависимостью от электрического поля. Полученные результаты качественно совпадают с экспериментальными осциллограммами тока [5-8] и напряжения и позволяют дать более полный анализ процессам, происходящим в диффузном барьерном разряде, а именно, выяснить моменты времени лавинно-стримерного перехода, замыкания головок стримера и т.д. Сильная ионизация и импульс тока происходят и на переднем и на заднем фронтах импульса напряжения, существенно заряжается граница диэлектрик-

воздух, что приводит к смене полярности электродов на заднем фронте импульса напряжения.

Список литературы:

1. Kogelschatz U. Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications // *Plasma Chem. Plasma Process.* 2002. Vol. 23, № 1. P. 1–46.
2. Ebert U. et al. The multiscale nature of streamers // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2006. Vol. 15, № 2.
3. Ebert U. et al. Multiple scales in streamer discharges, with an emphasis on moving boundary approximations // *Nonlinearity*. 2011. Vol. 24, № 1.
4. Steinle G. et al. Two-dimensional simulation of filaments in barrier discharges // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1999. Vol. 32, № 12. P. 1350–1356.
5. Shershunova E. et al. Diffuse DBD in atmospheric air at different applied pulse widths // *Acta Polytech.* 2015. Vol. 55, № 1. P. 59–63.
6. Malashin M. V. et al. On the possibility of generating volume dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure // *Tech. Phys. Lett.* 2013. Vol. 39, № 3. P. 252–254.
7. E. Shershunova, M. Malashin, S. Moshkunov V.K. Generation of Homogeneous Dielectric Barrier Discharge in Atmospheric Air without Preionization // *Plasma Sci. Technol.* 2013. P. 45–46.
8. Shershunova E.A. et al. Time-Space Radial Development of Nanosecond Dielectric Barrier Discharge in Flat Air Gaps under Atmospheric Pressure // *J. Phys. Conf. Ser.* 2018. Vol. 982, № 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ В ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКАХ

Ридель А.В.^{1,2}, Коробейников С.М.^{1,2}, Овсянников А.Г.², Карпов Д.И.¹

¹ Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

² Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Известно, что частичные разряды в трансформаторном масле являются одной из причин постепенного разрушения бумажно-масляной изоляции. Пузырьки в трансформаторе, которые образуются по разным причинам, в том числе неэлектрическим, могут транспортироваться системой охлаждения в область сильного электрического поля. Под действием сильного поля, в пузырьках возникают частичные разряды (ЧР), которые, в конечном итоге, могут вызвать разрушение изоляции. Механизмы возникновения и развития частичных разрядов в газовых включениях в твердой изоляции были исследованы ранее [1], тогда как механизмы частичных разрядов в жидкости до сих пор мало изучены.

Стоит отметить, что частичные разряды в свободно плавающих пузырьках в трансформаторном масле имеют две характерные особенности [2]:

1) напряжение зажигания ЧР не соответствует закону Пашена;

2) ЧР развивается очень редко. Например, в некоторых экспериментах мы наблюдали один ЧР за интервал времени, в течение которого между электродами прошло 30000 пузырьков.

Для выявления факторов, влияющих на данные характеристики экспериментальная установка, описанная ранее [2], была дооснащена рентгеновским аппаратом «МИРА-2Д». Он устанавливался под углом 45° к межэлектродному промежутку.

В результате были получены следующие данные:

1) напряжение зажигания ЧР соответствует закону Пашена;

2) время ожидания ЧР отсутствует.

На рисунке 1 показано, что ЧР развивается во всех пузырьках, находящихся в межэлектродном промежутке, одновременно. При этом разряд возникает практически сразу после включения рентгеновского аппарата, при условии, что напряжения для возникновения ЧР достаточно (по закону Пашена).



Рис. 1. ЧР в пузырьках при воздействии рентгеновского излучения.



Рис. 2. Деформация пузырька после развития ЧР.

После развития ЧР пузырек вытягивается вдоль направления электрического поля, причем часто вершина пузырька принимает форму, близкую к конической (рисунок 2).

В результате проделанной работы мы можем с уверенностью говорить о том, что напряжение зажигания ЧР в пузырьке соответствует напряжению, рассчитанному по закону Пашена. Однако, именно отсутствие иницирующих электронов является причиной нерегулярности развития ЧР во всплывающих пузырьках. Более высокое напряжение зажигания ЧР в случае отсутствия рентгеновского излучения связано с тем, что увеличивается интервал времени, в течение которого выполняются условия пробоя газового промежутка по закону Пашена. Тем самым увеличивается вероятность одновременного соблюдения двух условий, необходимых для развития ЧР:

1) достаточного для развития электронных лавин напряжения;

2) наличия иницирующего электрона.

Список литературы:

1. Bartnicas R. Partial discharges, their mechanism, detection and measurement // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2002. V. 9. N. 5. P. 763–808.
2. Korobeynikov S.M., Ovsyannikov A.G., Ridel A.V., Karpov D.I. Study of partial discharges in bubbles and microsphere in transformer oil // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1128. P. 012118(6).

Работа поддержана РНФ (грант № 16-19-10229)

КАПИЛЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДЕТОНАЦИОННЫХ АЛЮМООКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Штерцер А.А., Ульяницкий В.Ю., Батраев И.С.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

При нанесении электроизоляционных покрытий газотермическими способами, в т. ч. детонационным напылением (ДН), исследователи столкнулись с тем, что их (покрытий) электропроводность зависит от влажности окружающей атмосферы [1–4]. Это означает, что получаемые керамические слои обладают не только закрытой, но и открытой пористостью, частично в виде каналов-капилляров, проходящих через всю толщину покрытия от поверхности до подложки. Во влажной атмосфере часть капилляров заполняется абсорбируемой водой, по которой течет ток при приложении напряжения. В [4] сделана оценка доли площади покрытия μ , занимаемой выходящими на поверхность капиллярами, оказалось, что $\mu=0,5–2,0\%$. Там же выдвинуто предположение, что капилляры проходят по поверхностям контакта деформированных частиц. Исходя из этого, с учетом структуры покрытия, размер капилляров был оценен в десятки нанометров. В настоящей статье представлены результаты дальнейших исследований механизма электропроводности детонационных керамических покрытий.

С использованием ДН на стальных дисках диаметром 39 мм и толщиной 8 мм были получены покрытия толщиной $h=300$ мкм из порошка корунда М28 с размером частиц 20–28 мкм. Измерения удельной электропроводности покрытий проводились по ГОСТ Р 50499–93 с применением высоковольтного тестера изоляции АКТАКОМ АММ-2093 Hipot Tester AC/DC/IR. Прибор измеряет электросопротивление в диапазоне от 0,1 МОм до 10 ГОм. Для увеличения чувствительности измерений покрытия шлифовались до толщины 150 мкм и, по параллельной схеме, одновременно тестировались четыре образца. Измерения проводились в изолированном боксе при температуре $T=20\pm 2^\circ\text{C}$. Необходимая относительная влажность H создавалась увлажнителем воздуха “Magnit”, T и H контролировались метеостанцией RST IQ737. Удельное сопротивление покрытия вычислялось исходя из измеренного сопротивления R , известной суммарной площади измерительных электродов $S=40\text{ см}^2$ и известной толщине покрытий $h=150$ мкм по формуле

$$\rho = \frac{RS}{h}.$$

При низких значениях влажности вплоть до $H \approx 60\%$ сопротивление R превышало предел измерений прибора 10 ГОм, что соответствовало $\rho \geq 2,67 \cdot 10^{13}$ Ом·см. В диапазоне H от 60 до 80% происходит быстрый спад ρ на 2–3 порядка до 10^{11} и иногда даже до 10^{10} Ом·см.

Учитывая, что удельное сопротивление у чистой керамики $\rho > 10^{14}$ Ом·см, а у чистой (дистиллированной) воды $\rho \approx 10^7$ Ом·см, можно получить форму-

лу для расчета доли площади покрытия, занятой капиллярами

$$\mu = \frac{k\rho_a}{\rho} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_c} \right),$$

где $k=h_a/h$ – отношение средней длины капилляров к толщине покрытия. Оценка с учетом структуры покрытий показывает, что $k \approx 5$.

Анализ экспериментальных данных по зависимости удельного сопротивления покрытий от влажности проводился с использованием вышеприведенных уравнений и уравнения Кельвина для капиллярных явлений

$$H = \exp\left(-\frac{2\alpha V_m}{rRT}\right),$$

где r – максимальный радиус капилляра, который всасывает воду при влажности H , R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура, α – коэффициент поверхностного натяжения воды, V_m – молярный объем воды. Экспериментальные данные аппроксимировались экспонентой. В результате было получено уравнение для распределения поверхностной плотности капилляров по радиусу

$$n(r) = \frac{k\rho_a}{\rho_c \pi^2} [\exp(14 \cdot H) - 1].$$

Оценки показывают, что максимальная плотность капилляров в детонационном алюмооксидном покрытии $n \approx 10^8\text{ см}^{-2}$ приходится на их диаметр $d=2r=8–20$ нм. Для капилляров с $d=100$ и 200 нм плотность n соответственно на 1 и 2 порядка ниже. Для исключения влияния влажности на электропроводность капилляры можно пропитывать жидким диэлектриком, например, силиконовым маслом.

Список литературы:

1. Pawlowski L. The relationship between structure and dielectric properties in plasma-sprayed alumina coatings // Surf. Coat. Technol. 1988. V. 35. P. 285–298.
2. Toma F.L., Scheitz S., Berger L.M., Sauchuk V., Kusnezoff M., Thiele S. Comparative study of the electrical properties and characteristics of thermally sprayed alumina and spinel coatings // J. Therm. Spray Tech. 2011. V. 20. P. 195–204.
3. Niittymäki M., Lahti K., Suhonen T., Metsäajoki J. Effect of temperature and humidity on dielectric properties of thermally sprayed alumina coatings // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2018. V. 25. P. 908–918.
4. Ульяницкий В., Штерцер А., Батраев И. Электроизоляционные свойства алюмооксидных детонационных покрытий // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2018. Т. 20. № 4. С. 83–95.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках проекта № 18-43-540008.10



СЕКЦИЯ 10

Теплообмен и гидродинамика
в технологических процессах
и защита окружающей среды



ВНУТРЕННЯЯ АЭРОДИНАМИКА МОДЕЛИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ЧЕТЫРЕХВИХРЕВОЙ ТОПКИ

Алексеев С.В., Шадрин Е.Ю., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Бойко Е.Е.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

e-mail: evgen_zavita@mail.ru

Сжигание органических топлив (таких как уголь) в настоящее время обеспечивает основную долю потребляемой электрической и тепловой энергии. Истощение запасов высококачественного топлива (высокая теплотворная способность, низкая зольность и высокие экологические показатели) обуславливает необходимость вовлечения в топливно-сырьевую базу низкосортных углей. Использование таких углей труднореализуемо в связи с отсутствием технологий сжигания, обеспечивающих современные энергетические и экологические показатели. Одной из перспективных технологий является сжигание топлива в вихревом потоке. Закрутка потока позволяет интенсифицировать процессы воспламенения и горения топлива и добиться равномерности поля температуры и уменьшения её среднего значения, что ведет к снижению уровня токсичных продуктов сгорания [1]. Оптимизация внутренней аэродинамики данных устройств за счет проведения лабораторного моделирования является первым этапом при их разработке и модернизации.

В данной работе экспериментально исследуется структура потока в лабораторной изотермической модели (масштаб 1:25) перспективного топочного устройства с четырехвихревой схемой сжигания твердого топлива.

Данная схема разработана для усовершенствования существующей четырехвихревой топки [2]. Оценка эффективности реконструкции котла для сжигания в нем высокозольных углей выявила ряд недостатков в работе котла, требующих дальнейшей его модернизации. Для научного обоснования путей повышения технико-экономических и экологических показателей данной топки необходимо детальное изучение её аэродинамики на лабораторных моделях.

В данной работе на основе физического моделирования проведены исследования внутренней аэродинамики модели усовершенствованной четырехвихревой топки для различных режимов. С использованием метода PIV (Particle Image Velocimetry) получена информация о распределении осредненной скорости и пульсаций скорости в различных сечениях модели. На рисунке 1 представлено характерное поле скорости, демонстрирующее наличие в исследуемой модели четы-

рех замкнутых вихрей с вертикальными осями вращения.

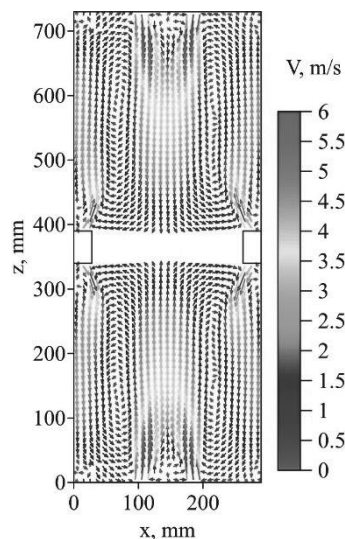


Рис. 1. Векторное поле скорости, полученное методом PIV в модели усовершенствованной четырехвихревой топки.

В результате проведенных исследований проанализированы основные особенности закрученного потока в модели усовершенствованной четырехвихревой топки. Полученные экспериментальные данные позволяют верифицировать математические модели с целью проведения полномасштабных численных расчетов топочных процессов.

Список литературы:

1. Саломатов В. В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006.
2. Патент РФ № 2032853. Призматическая экранированная топка. Патентообладатель: Сибирский филиал ВТИ. Авторы: Срывков С.В., Процайло М.Я., Дектерев А.А., Козлов С.Г., Пронин М.С., Ковалевский А.М., Попов В.П. Зарегистрирован 10.04.1995. Приоритет от 01.09.1992.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00443)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОЛОМЫ: СВЯЗЬ МЕЖДУ ВЫХОДОМ ПРОДУКТОВ И ТЕПЛОВЫМ ЭФФЕКТОМ ПИРОЛИЗА

Алтынбаева Д.Б., Астафьев А.В., Табакаев Р.Б.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Стремление человечества снизить негативное воздействие энергетики на окружающую среду приводит к решению вовлечения возобновляемых источников энергии, в частности биомассу. Уже в настоящее время биомасса играет важную роль в топливно-энергетическом балансе таких стран, как Швеция, Дания, Австрия и др. [1]. Этому способствует разработка нетрадиционных технологий энергетического использования биомассы, повышающих ресурсоэффективность и экологичность сжигания.

Пиролиз относится к одним из наиболее перспективных технологий вовлечения биомассы в энергетику, позволяющий перерабатывать низкосортное органическое сырье в высококалорийные твердые и жидкие продукты, горючий газ. Широкому распространению пиролизных технологий в энергетических целях препятствуют высокие эксплуатационные затраты, связанные с необходимостью подвода тепла для осуществления процесса. Однако имеются предпосылки к реализации этого процесса в автотермическом режиме за счет собственного тепловыделения, происходящего за счет протекания экзотермических реакций [2].

Необходимо отметить, что пиролиз биомассы сопровождается огромным количеством протекающих при этом реакций, каждая из которых имеет свой экзо- или эндотермический эффект [3]. Рассмотрение каждой из протекающих реакций по отдельности не представляется возможным.

Целью настоящей работы является исследование теплового эффекта пиролиза в зависимости от выхода продуктов процесса.

В качестве объекта исследования рассмотрена солома. В процессе исследования использованы следующие методы: дифференциальный термический анализ (ДТА) и физический эксперимент по исследованию состава газа, образующегося при пиролизе биомассы, и выходу пирогенетической влаги.

ДТА использован для установления тепловых эффектов пиролиза соломы. Анализ проведен на микро-термоанализаторе STA 449C (Netzsch, Германия) в инертной среде (гелий) при скорости нагрева образца 10 °C в минуту. Видно (рис. 1), что в процессе пиролиза биомассы при 220°C возникают экзотермические реакции, обеспечивающие положительный характер теплового эффекта до 580°C. При этом происходит резкое снижение массы (кривая TG) с 94 до 32%, обусловленное выходом летучих продуктов пиролиза (газа, паров смолы и пирогенетической воды). Максимальная скорость изменения массы наблюдается при температуре 320°C (кривая DTG).

Результаты экспериментальных исследований (рис. 2) показывают, что при температуре начала возникновения экзотермических реакций (220°C) начинают выделяться оксиды углерода (углекислый

и угарный газы). Наибольшая концентрация этих оксидов наблюдается при температурах 320–330°C, что совпадает с наибольшим выходом пирогенетической влаги. При этих же значениях температуры начинает выделяться метан, достигая максимума своей концентрации при 490°C (максимум экзотермического пика на рис. 1, кривая DTA).

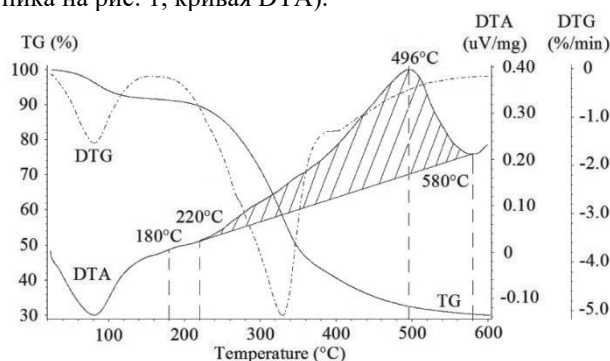


Рис. 1. Кривые дифференциально-термического анализа соломы.

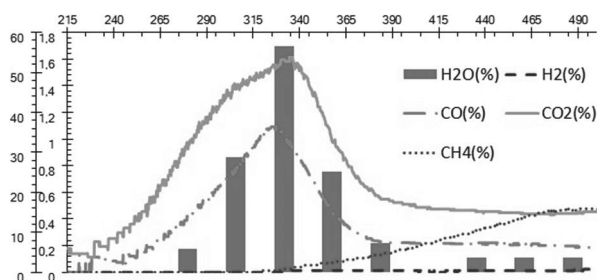


Рис. 2. Динамика выхода пирогенетической влаги и газа в процессе пиролиза соломы.

Термическое разложение соломы сопровождается положительным тепловым эффектом, начинающимся при 220°C и оканчивающимся при 580°C. Протекание экзотермических реакций влечет за собой образование оксидов углерода и пирогенетической влаги. Максимальный выход пирогенетической влаги совпадает по значению температуры (320–330°C) с наибольшей концентрацией оксидов углерода.

Список литературы:

1. Справочник по возобновляемой энергетике Европейского союза / Г.В. Ермоленко и др.: Институт энергетики НИУ ВШЭ, 2016. 96 с.
2. Tabakaev R.B., Astafev A.V., Dubinin Y.V., Yazykov N.A., Zavorin A.S., Yakovlev V.A. Autothermal pyrolysis of biomass due to intrinsic thermal decomposition effects // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2018. Vol. 134. Issue 2. P. 1045-1057.
3. Milosavljevic I., Oja V., Suuberg E.M. Thermal effects in cellulose pyrolysis: relationship to char formation processes // Industrial & Engineering Chemistry Research. 1996. Vol. 35. P. 653–662.

Работа выполнена при поддержке РФФИ
(проект № 18-38-00648)

**ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКА РАСПЫЛА
ЖИДКОТОПЛИВНОГО ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА МЕТОДОМ IPI****Ануфриев И.С., Шадрин Е.Ю., Копьев Е.П., Мухина М.А.**

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
e-mail: evgen_zavita@mail.ru

Одним из способов эффективного и экологически безопасного использования низкокачественных жидких топлив (таких, как отработанные масла, отходы нефтепереработки и др.) является их сжигание с предварительным распылением. Имеющиеся технологии зачастую не позволяют использовать подобные топлива в качестве основных, поскольку сжигание топлива с высоким содержанием примесей приводит к увеличению выброса вредных продуктов сгорания, а так же к сбоям в работе горелочного устройства.

В ИТ СО РАН предложен и разработан оригинальный способ подачи топлива и смешения его с окислителем, а именно – способ распыла жидкого углеводородного топлива газовой струей [1]. Отличительной особенностью данного подхода является то, что топливо и распыляющая среда (несущая фаза) – предварительно не смешаны друг с другом: газ выходит из форсунки в виде струи, в которую подается жидкое топливо, в результате чего формируется мелкодисперсный газокapельный поток. На практике это является важным преимуществом, поскольку нет контакта топлива с форсункой, что предотвращает коксование ее поверхностей и последующие сбои в работе горелочного устройства при использовании высоковязких топлив, либо топлив с низкой степенью очистки.

Так как характеристики сжигания жидкого углеводородного топлива в горелочных устройствах зачастую зависят от качества его подготовки и дальнейшего диспергирования распылительными устройствами, обеспечение необходимого дробления подаваемого топлива позволяет достигать более полного протекания реакции горения за счет увеличения площади контакта топлива и окислителя. Поэтому при создании распылительных форсунок для горелочных устройств необходима детальная информация о характеристиках генерируемого газокapельного потока. Однако, чрезвычайная сложность взаимосвязанных физических процессов, влияющих на характеристики формирования газокapельного потока, ограничивает возможности применения теоретических методов и требует применения экспериментальных методов.

В настоящей работе для исследования дисперсного состава газокapельного потока при распылении отработанного трансмиссионного масла высокоскоростной воздушной струей (диаметр форсунки 0.5 мм) используется метод IPI (Interferometric particle imaging) [2]. Данный метод позволяет разрешать размеры капель от 10 мкм. Такой диапазон измерений приемлем для качественного анализа характеристик распылительного элемента.

В экспериментах использовалась IPI-система, реализованная в измерительном комплексе «ПОЛИС» (ООО «Сигма-Про», г. Новосибирск). Основными элементами системы являются: CCD камера ImperX B4820-M (с разрешением 4904x3280 пикселей); макрообъектив SIGMA 105mm F2.8 DG MACRO; блок оптического сжатия для уменьшения образов капель по одной координате; подвижка для камеры – длинноходовый транслятор Edmund 59–336; программное обеспечение ActualFlow с пакетом IPI Kit.

Измерения проведены на блоке распыла, в котором реализован способ диспергирования топлива на принципе взаимодействия топлива с высокоскоростной воздушной струей, при различных режимных параметрах (варьировались: температура воздуха в диапазоне 150–550°C, давление воздуха на выходе из форсунки 5–8 атм., расход топлива 1.2–1.4 кг/ч). В результате проведения экспериментов определено, что наименьший преимущественный размер капель в потоке (<30 мкм), необходимый для эффективного сжигания распыленного жидкого топлива [3].

Список литературы:

1. Патент РФ на изобретение № 2450207, Горелочное устройство. Опубликовано 10.05.2012, приоритет от 28.10.2010, патентообладатель ИТ СО РАН. Автор: Вигриянов М.С.
2. Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М. Интерферометрический метод измерения диаметров капель // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18. № 1. С. 1–13.
3. Danis A.M., Namer I., Cernansky N.P. Droplet size and equivalence ratio effects on spark ignition of monodisperse N-heptane and methanol sprays // Combustion and Flame. 1988. Vol. 74. No. 3. P. 285–294.

*Исследования выполнены в рамках
государственного задания ИТ СО РАН
(рег. номер НИОКТР АААА-А17-117022850029-9)*

РАЗРАБОТКА СТРУЙНОГО ФРОНТОВОГО МОДУЛЯ С ОБРАЩЕННОЙ LPP СХемой СЖИГАНИЯ ЖИДКИХ ТОПЛИВ

Васильев А.Ю., Гольцев В.Ф., Кауфман С.В., Майорова А.И., Фурлетов В.И.

Центральный институт авиационного машиностроения им. П.И. Баранова,
111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2

Основная идея организации рабочего процесса в малоэмиссионных камерах сгорания заключается в использовании пламен с предельно низкой температурой горения, т.е. в сжигании однородной и настолько бедной смеси, насколько это возможно. Этот принцип организации горения получил название LPP (Lean-Premixed-Prevaporated combustion). Согласно оценкам для снижения уровня эмиссии NO_x на 50% относительно норм ICAO 2008 г. существенную часть топлива (до 70%) следует сжигать в составе бедной однородной смеси с температурой пламени не выше 1900 К. Разработка способов первичной подготовки такой смеси и устойчивого ее сжигания в объеме камеры сгорания – ключевая проблема создания малоэмиссионных камер сгорания.

Для решения поставленной задачи была выбрана нетрадиционная, «обращенная» схемы горения. Смесь на периферии горит по диффузионному механизму, обеспечивая с помощью индивидуального кольцевого нишевого стабилизатора, надежное поджигание «бедной» предварительно перемешанной и частично испаренной смеси извне (пламя распространяется к оси горелки) и бесперебойную передачу пламени к соседним горелкам. Предложено создать короткую камеру сгорания с нетрадиционной схемой горения формирующейся с помощью СФУ – струйных фронтальных устройств (рис. 1), которые могут располагаться в кольцевой камере сгорания в один ряд. В центральной части кольцевой жаровой трубы в следе за основной форсункой организуется горение «бедной», хорошо перемешанной смеси топлива с воздухом, а на периферии – диффузионное горение «богатой». Однородная смесь создается пневматической форсункой и струйным завихрителем. Стабилизация пламени обеспечивается кольцевыми нишевыми стабилизаторами, расположенными вокруг каждой форсунки и струйного завихрителя. Топливо подается в нишевые стабилизаторы отдельно через пилотные, пусковые форсунки. «Богатая», диффузионная зона горения работает всегда. «Бедная», центральная – на режимах выше Малога Газа. На режиме взлета в центральную форсунку будет подаваться основная часть топлива (70%), в периферийные форсунки – меньшая часть (30%). Принципиальным моментом в конструкции предлагаемого устройства является то, что в струйном смесителе закрутка потока воздуха обеспечивается наклонными струями, а не лопаточным завихрителем, имеющим ряд недостатков. Главный его недостаток – невозможность добиться равномерного распределения капель топлива по всему поперечному сечению потока.

Для использования в качестве основной была разработана струйная пневматическая форсунка с пода-

чей топлива через шнек. Через осевой канал форсунки в зону смешения дополнительно подается струя воздуха. Разработанные форсунки позволили получить аэрозоль с равномерным распределением топлива и хорошей мелкоствольностью размеров капель.

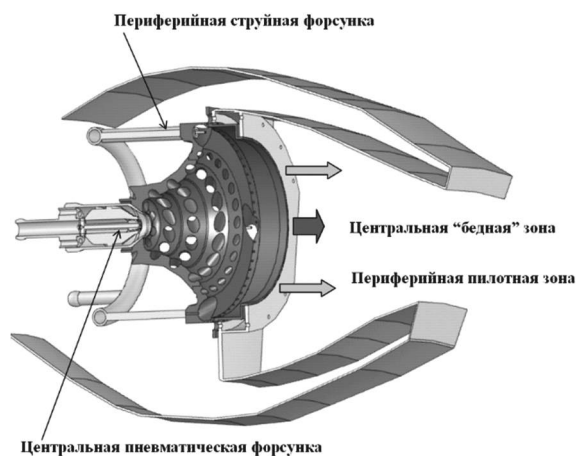


Рис.1 Схема фронтального устройства со струйным смесителем и нишевым стабилизатором пламени.

На первой стадии работы был проведен предварительный анализ выбранной схемы горения. Оптимальное распределение топлива между зонами диффузионного и гомогенного горения рассчитывалось по двум методикам. Был выполнен численный анализ предложенной схемы в упрощенной постановке на основе авторской феноменологической модели горения. Модель учитывает расширение «бедной» области воспламенения с ростом температуры и влияние закрутки на скорость горения. Был также проведен теоретический анализ эмиссии оксидов азота. Расчеты по обеим методикам показали, что для достижения оптимальных характеристик камеры сгорания доля топлива, сжигаемого по диффузионному механизму, должна составлять 20–50%.

Проектирование СФУ проведено на основе гидравлического и трехмерного аэродинамического расчетов. Холодные аэродинамические испытания опытного образца СФУ показали, что смеситель обеспечивает требуемый малый размер капель топлива и достаточно равномерную его концентрацию на выходе. Расчет индекса эмиссии подтвердил правильность выбранной конструкции смесителя и принципа организации горения. При сжигании 20–50% общего расхода топлива в зоне диффузионного горения расчетная величины индекса эмиссии EINO_x для двигателей с $\pi_k=30$ оказалась равной на режиме взлета 20 г-NO_x г/кг-топлива.

КЛАССИФИКАЦИЯ ФОРСУНОК

Васильев А.Ю., Домрина Е.С, Майорова А.И.

Центральный институт авиационного машиностроения им. П.И. Баранова,
111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2

В газотурбинных двигателях представлены разнообразные форсуночные устройства, отличающихся не только конструкцией, но и принципами, на которых реализуется распыл топлива. Анализ ряда работ позволил сделать вывод о возможности разделения множества типов форсунок для ГТД и ГТУ по трём основным группам и трём промежуточным (комбинированным) группам.

Гидравлическое распыливание – процесс, при котором на распад формы жидкости расходуется энергия самой жидкой формы (собственные колебания струи, потеря устойчивости пленкой жидкости).

- Механическое распыливание – процесс, при котором распад формы жидкости происходит под действием внешних, не аэродинамических, сил (воздействии акустических резонаторов, электрических полей и др.).

- Пневматическое распыливание – процесс, при котором на распад формы жидкости расходуется энергия подводимого в форсунку воздуха от основного компрессора ГТД и ГТУ (распыливание различных форм жидкости (струя или пленка) одним или несколькими потоками воздуха).

- Комбинированное механическо-гидравлическое распыливание – процесс, при котором в распаде формы жидкости принимает участие не только энергия самой жидкой формы, но и пассивного внешнего источника (распыл с поверхности, сталкивающиеся струи).

- Комбинированное механическо-пневматическое распыливание – процесс, при котором в распаде формы жидкости принимает участие не только энергия подводимого в форсунку воздуха от основного компрессора, но и внешнего источника, включая воздух большего давления, чем располагаемый в двигателе (форсунки с барботированием, акустические форсунки с подводом энергии через газ и др.).

- Комбинированное гидравлическо-пневматическое распыливание – процесс, при котором в распаде формы жидкости принимает участие как энергия самой жидкой формы, так и энергия подводимого в форсунку воздуха от основного компрессора (комбинированные центробежно-пневматические форсунки, форсунки с аэрацией и др.).

Предложенная схема общей классификации форсунок (рис. 1), разработана для упрощения выбора конструктором требуемой форсунки в каждом конкретном случае.

Разработанная общая классификация форсунок с описаниями принципов работы, достоинств и недостатков, может использоваться для выбора типа разрабатываемого устройства. Наиболее перспективным, выбранным из приведенных в работе описаний, является тип устройства с распыливанием топлива

высокоскоростным воздушным потоком. Такие форсунки обладают рядом преимуществ по сравнению с гидравлическими и механическими форсунками, особенно в газотурбинных двигателях с высокой степенью повышения давления воздуха. Они не требуют высокого избыточного давления подачи топлива и хорошо распыливают его. Авторы предлагают систематизировать форсуночные устройства по способу и месту взаимодействия воздушного потока и жидкого топлива. Устройства разделяются на форсунки с использованием вспомогательного воздуха, подаваемого от внешнего источника (баллон или насос) и форсунки, работающие на воздухе от воздуха от основного компрессора газотурбинного двигателя.

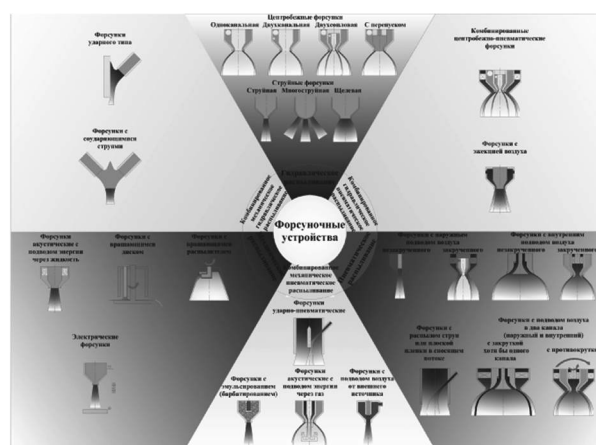


Рис. 1. Общая классификация форсунок.

На основании поисковых исследований можно сделать вывод о необходимости разработки новых систем распыливания, обеспечивающих не только надежный запуск, устойчивую работу камеры сгорания, отсутствие нагарообразования, но и требуемые эмиссионные характеристики на всех режимах работы двигателя. При максимальном давлении подачи топлива, закладываемом при проектировании камер сгорания перспективных двигателей, порядка 3 МПа, существует опасность невыполнения форсункой с чисто пневматической схемой распыливания предъявляемых к ней требований. Появляется необходимость использования форсунок не только усложненной пневматической схемы, но и применения устройств, имеющих возможность подачи воздуха от внешнего источника.

При создании комбинированных низконапорных пневматических систем распыливания для КС перспективных ГТД и ГТУ необходимо учитывать аэрогидродинамические основы пневматического распыливания, схемы взаимодействия топлива с воздушным потоком, влияние геометрических характеристик устройства на свойства топливовоздушного факела.

ОТЛИЧИЯ ХАРАКТЕРИСТИК И УСЛОВИЙ СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА И СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ И БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Вершинина К.Ю., Дорохов В.В., Романов Д.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Прямое сжигание многих промышленных отходов характеризуется достаточно высокими выбросами опасных веществ [1]. Такие отходы ежегодно аккумулируются в больших объемах по всему миру [2]. К тому же не все отходы являются легковоспламеняющимися или горючими. Требуется большие расходы энергии на их подготовку для сжигания. Технологии переработки большинства отходов экономически невыгодны.

В настоящей работе предложен альтернативный вариант использования промышленных отходов, заключающийся в их применении в качестве основных и дополнительных компонентов топливных суспензий на основе воды. Экспериментально определены основные энергетические (теплота сгорания, времена и температуры зажигания, длительности и температуры горения) и экологические (SO_x, NO_x) параметры зажигания и горения топлив. Основное внимание уделено расчету коэффициента полезного использования топливных суспензий, учитывающего экологические, экономические и энергетические показатели сжигания.

Компонентами топлив являлись опилки, растворитель, тяжелая нефть, солома, и картон. Отходы водоочистки (влажность ≈80%) являлись жидкой основой суспензий. Все новые виды топлива сравнивались по всем изученным параметрам с водоугольным топливом на основе каменноугольной пыли.

Экспериментальная установка для определения параметров зажигания и горения представляет набор технических средств, включающий модельную камеру сгорания (муфельную печь), механизированное устройство ввода топлива, систему видеорегистрации, ПК для управления устройствами, термодатчики, регистратор температуры, тепловизор для бесконтактного измерения температуры поверхности топлива, газоанализатор. Концентрации оксидов серы и азота в продуктах сгорания определялись при сжигании навески топлива массой около 1 г. Остальные параметры определялись для одиночной капли суспензии (начальный радиус ≈1 мм), сжигаемой в муфельной печи. Температура нагрева варьировалась в диапазоне 300–1000°C. Детальное описание методики и погрешностей средств измерений приведено в [3].

На основе экспериментальных данных рассчитывался показатель относительной эффективности использования топлива, характеризующий получение удельного количества теплоты (МДж/кг) в расчете на стоимость (€/кг) топливной композиции и концентрацию выбросов оксидов серы и оксидов азота в продуктах сгорания (ppm). Также данный показатель рассчитывался для угля и мазута, как для наиболее распространенных в энергетике топлив. После соответствующих подсчетов показатель использования нового композиционного топлива делился на аналогичный показатель для угля или мазута. Результаты

расчетов приведены на (рис. 1). Значения показателя эффективности угля и мазута равны 1. Если показатель исследуемого топлива превышает 1, то можно говорить о его преимуществе по рассмотренным параметрам относительно угля или мазута.

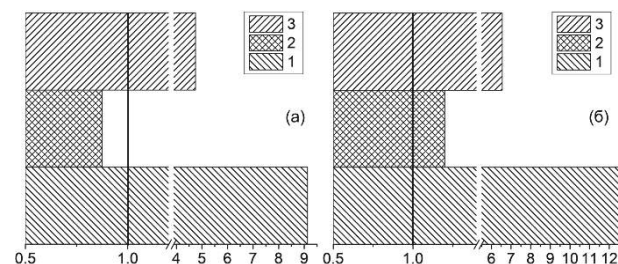


Рис. 1. Показатель эффективности использования топлив (1–50% – опилки, 40% – отход водоочистки, 10% – растворитель; 2–25% – солома, 25% – картон, 40% – отход водоочистки, 10% – тяжелая нефть; 50% – уголь К, 50% – отход водоочистки) относительно угля (а) и мазута (б).

Относительные показатели экологической, экономической, энергетической эффективности сжигания для изученных суспензий в 1.2–12.58 раз выше, чем для угля и мазута. Преимущество достигается за счет низкой эмиссии вредных газов и невысокой стоимости компонентов. Суспензия с добавкой тяжелой нефти (столбец 2, рис. 1) уступает углю по причине высокой стоимости нефти в сравнении с отходами. Однако эта топливная композиция является наилучшей с точки зрения простоты розжига (минимальные температуры и времена зажигания). Согласно полученным результатам, можно рекомендовать использование отходов в качестве основных и дополнительных компонентов суспензионных топлив. Такой подход перспективен с точки зрения полезного использования многочисленных горючих отходов разных секторов экономики; возможности замещения сжигания угля и, соответственно, уменьшения выбросов опасных газов; диверсификации сырьевой базы энергопредприятий за счет топлив с низкой стоимостью.

Список литературы:

1. Al Asfar J.J., AlShwawra A., Sakhrich A., Hamdan M.A. Combustion characteristics of solid waste biomass, oil shale, and coal // Energy Sources Recovery Util. Environ. Eff. 2018. V. 40(3). P. 335–342.
2. Global Waste Management Outlook. United Nations Environment Programme. 2015.
3. Dmitrienko M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals // J. Hazard. Mater. 2017. V. 338. P. 148–159.

Исследования выполнены за счет средств
Российского научного фонда
(проект № 18-73-00013)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА НА БАЗЕ ВАКУУМНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Волгин В.С., Гиневский А.Ф.

Национальный Исследовательский Университет «МЭИ»
111250, Москва, Красноказарменная, 17

Солнечный термоэлектрический генератор (СТЭГ) – энергетическая установка, в которой полученное из солнечного излучения тепло используется для генерации электричества на термоэлектрических модулях (ТЭМ), за счет создания перепада температуры на сторонах модуля. Создание термоэлектрического генератора на базе преобразователей солнечной энергии в тепло, является одним из путей развития солнечной энергетики, преимуществом которого является способность обеспечивать потребителя электрической и тепловой энергией.

Существует ряд концепций СТЭГ, которые отличаются по способу подведения солнечной энергии к ТЭМ. В работе рассматриваются СТЭГ, в которых преобразование солнечного излучения осуществляется с помощью солнечных вакуумных коллекторов, имеющих наибольшую среди коллекторов эффективность преобразования солнечной энергии в тепловую. Конструкция коллектора базируется на вакуумной трубке, которая является двухслойной колбой, выполненной из прочного боросиликатного стекла с вакуумной прослойкой между внешним и внутренним слоем. Такая конструкция колбы хорошо пропускает солнечное излучение, и хорошо изолирует теплоноситель от теплообмена с окружающей средой. Внутри колбы находится адсорбер, поглощающий солнечное излучение с которого производится съем теплоты и передача ее потребителю.

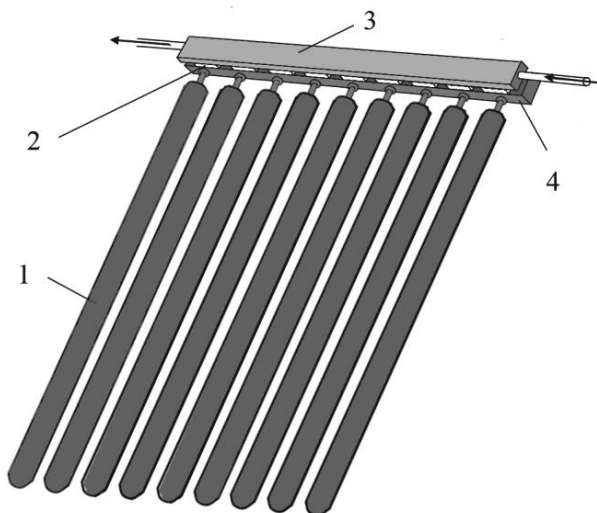


Рис. 1. Принципиальная схема СТЭГ на базе вакуумного коллектора. Цифрами отмечены: 1 – Трубка вакуумного коллектора, 2 – ТЭМ, 3 – Проточный жидкостный теплообменник 4 – Общий теплоотток.

Исследования данной концепции начались относительно недавно, и уже предложен ряд конструкций, базирующихся на вакуумных коллекторах [1, 2]. Однако на данный момент они имеют низкий потенциал для применения в реальных условиях из-за недоста-

точной мощности, эффективности, либо из-за сложности конструкции. Мощность генерации электрического тока в представленных конструкциях составляет менее 0.2 Вт на одну трубку солнечного коллектора. Поэтому главными задачами для разработчиков на данный момент является увеличение эффективности текущих решений и поиск новых.

В рамках поиска более совершенного варианта СТЭГ на базе солнечного вакуумного коллектора, была разработана оригинальная конструкция (см. рис. 1). Она обладает относительной простотой, и позволяет создавать различные температурные условия для ТЭМ в широком диапазоне значений.

Целью данной работы являлось исследование особенностей работы и оценка эффективности приведенной выше конструкции СТЭГ с помощью численного моделирования. Была разработана математическая модель, в которой реализованы принципы функционирования солнечного вакуумного коллектора и расчет теплового баланса установки с окружающей средой, расчет внутренних источников и стоков тепла в ТЭМ, возникающих в результате протекания тока, а так же моделирование теплообмена холодного спая ТЭМ с теплоносителем за счет решения задачи сопряженного теплообмена теплоносителя со стенкой жидкостного теплообменника.

Был создан программный пакет обеспечивающий расчет температурного поля, и гидродинамики в установке, и вычисляющий ее электрические характеристики на основе среднего перепада температуры на спаях в ТЭМ полученного из температурного поля. С помощью программного пакета был произведен расчет конфигураций с разным соотношением количества ТЭМ к вакуумным трубкам в коллекторе, а так же с использованием серийных моделей вакуумных трубок и ТЭМ от разных производителей.

В результате показано, что при уменьшении количества ТЭМ по отношению к количеству трубок, суммарная мощность выработки электричества возрастает. При 10 трубках в вакуумном коллекторе максимальная достигнутая мощность генерации электричества составила 15.5 Вт, или 1,55 Вт к одной трубке коллектора. Максимальный перепад температур на спаях ТЭМ достигаемый с помощью СТЭГ составил 118.8°C, при максимальной температуре, достигаемой на адсорбере в 174.2°C.

Список литературы:

1. A.Y. Faraji et al. Base-load thermoelectric power generation using evacuated tube solar collector and water storage tank. // Energy Procedia, 2014, v. 57, p. 2112–2120.
2. D. Kraemer, B. Poudel et al. High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration. // Nature Materials, 2011, v.10, p. 532–538.

Деев Равад (Сирия), Сиденков Д.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, 14

В энергоустановках на низкокипящих рабочих веществах, работающих по «органическому» циклу Ренкина (ОЦР), одним из основных теплообменных аппаратов является разделительный теплообменник. В качестве разделительного теплообменника могут применяться трубные пучки, наружная поверхность трубок омывается горячей (газовой) средой, а внутри труб протекает теплоноситель ОЦР.

Круглые трубы широко используются в теплообменном оборудовании из-за простоты производства и способности выдерживать высокое давление. Однако при внешнем обтекании круглой трубы, в кормовой части трубы образуется вихревая зона с перестройкой структуры пограничного слоя, что может приводить к существенным потерям давления и значительным вибрациям. Исследования показывают, что трубки каплевидной формы имеют малые коэффициенты сопротивления и высокие числа Нуссельта по сравнению с круглыми трубками с одинаковой длиной периметра поперечного сечения [1, 2].

Разработана математическая и численная модель для расчета теплообмена и гидродинамики пучка каплевидных труб с учетом напряжённо-деформированного состояния.

С помощью программы ANSYS проводится численное исследование теплообмена и гидродинамического сопротивления пучка из 22 каплевидных труб шахматной компоновки (рис.1). Каплевидные трубы имеют следующие размеры: длина 305 мм, радиус широкой части 5,8 мм, радиус малой части 2,9 мм, эквивалентный диаметр равен 22,5 мм (см. рис.2). Трубы располагаются с продольными и поперечными шагами 37 мм, при обтекании этих труб турбулентным потоком воздуха со скоростью 1,33 м/с, что соответствует числам Рейнольдса $1,8 \times 10^3$.

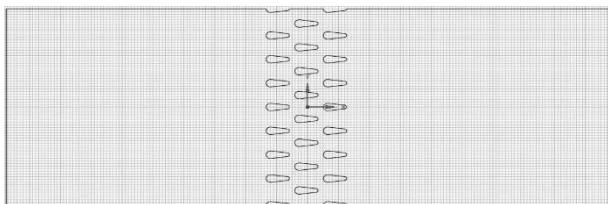


Рис.1. Схематическая плоскость каплевидных труб шахматной компоновки

Верификация разработанной математической и численной модели проведена путем сравнения с результатами, полученными в работе [3] (эффект деформации не учитывался) экспериментально и численно. Получено хорошее совпадение, что позволяет рекомендовать разработанную численную модель для расчета состояний подобных систем.

На рис. 3 и 4 представлены результаты расчета теплообмена и гидродинамики пучка каплевидных труб с учетом напряжённо-деформированного состояния.

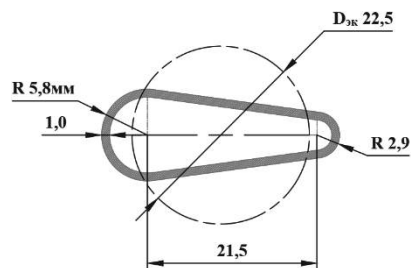


Рис.2. Поперечное сечение каплевидной трубы без нагрузки

С помощью пакета ANSYS, получены распределения скорости, давления, температуры, механических напряжений и коэффициента теплоотдачи по периметру трубы. Показано, что учет напряженно-деформированного состояния при охлаждении внешнего потока приводит к изменению средней скорости в узком сечении в сторону увеличения, что влияет также на коэффициент теплоотдачи.

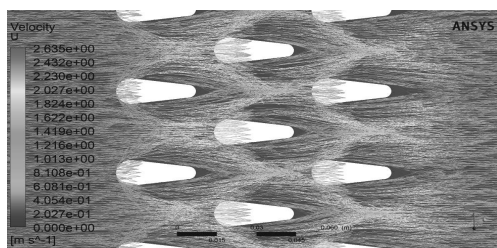


Рис.3. Поле скорости в шахматном пучке с трубами каплевидной формы под нагрузкой.

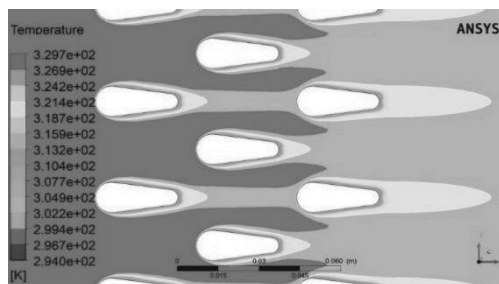


Рис.4. Поле температуры в шахматном пучке с трубами каплевидной формы под нагрузкой.

Список литературы:

1. Nouri-Borujerdi A., Lavasani A. M. Experimental study of forced convection heat transfer from a cam shaped tube in cross flows // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50 (13), pp.2605–2611.
2. Nouri-Borujerdi A., Lavasani A. M. Pressure loss and heat transfer characterization of a cam-shaped tube at different orientations // Journal of Heat Transfer, 2008, 130 (12), doi:10.1115/1.2969259.
3. Sayed E.S.A., Emad Z.I., Osama M.M., Mohamed A.A., Heat transfer characteristics of staggered wing-shaped tubes bundle at different angles of attack // Heat and Mass Transfer, 2014, vol. 50, № 8, pp. 1091–1102.

Работа выполняется при поддержке грантом
РФФИ № 17-08-01671-а

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ ВСТАВКУ

Дехтярь Р.А.^{1,2}, Овчинников В.В.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

При решении проблемы теплоотдачи от стенки канала к фильтрующей жидкости через пористую вставку усилия исследователей направлены на получение более или менее универсальных зависимостей в широком диапазоне режимных и геометрических параметров. Несмотря на достаточно большое число публикаций [1–4] и предлагаемых эмпирических зависимостей для расчета теплообмена в зернистой среде, в настоящее время не представляется возможным достаточно обоснованно рекомендовать ту или иную зависимость для практического применения.

В настоящей работе выполнены систематические исследования коэффициента теплоотдачи α на стабилизированном участке теплообмена при постоянном тепловом потоке на стенке ($q = \text{const}$) и гидравлического сопротивления при фильтрации воды и водного раствора глицерина через круглую трубу, заполненную моносферическими шариками различного диаметра (материал – стекло). Шарика засыпались в круглую трубу диаметром 52 мм, длиной 565 мм и с толщиной стенки 1.6 мм. В стенку трубы закладывались 12 нихром-константановых термопар, определенным образом распределенных по длине трубы. На наружную стенку трубы был намотан ленточный нихромовый нагреватель (0,5×10 мм), который был изолирован от медной трубы слюдой. Поверх нагревателя был нанесен слой теплоизоляционного материала. Также измерялись температуры жидкости на входе в рабочий участок и на выходе из него, температура нагревателя и воздуха в помещении, а также перепад давления на рабочем участке. Тепловые потери через теплоизоляцию в окружающую среду определялись в специальных тарировочных опытах. Опыты проводились в замкнутом циркуляционном контуре (см. рис.1), обеспечивающим расход жидкости от 0,007 кг/с до 0,4 кг/с.

Представлены данные измерения гидравлического сопротивления для шариков диаметра $d = 3,2$ мм, выполненные одновременно с определением коэффициентов теплоотдачи при фильтрации воды и 47% раствора глицерина.

Проведено сопоставление полученных результатов по теплообмену в шаровых засыпках с имеющимися литературе данными [4]. Показано, что наши экспериментальные данные для участка тепловой стабилизации в области высоких чисел Рейнольдса хорошо согласуются с данными из [4], полученными при фильтрации воздуха через зернистую среду, и могут быть обобщены зависимостью вида (рис. 2):

$$Nu_d = 0,4 Re_d^{2/3} Pr^{0,4},$$

где $Nu_d = \alpha d / \lambda$, $Re_d = Ud / \nu$, $Pr = \nu / a$, α – коэффициент теплоотдачи, d – диаметр элемента зернистого слоя, U – скорость фильтрации, ν , a , λ – кинематическая вяз-

кость, температуропроводность и теплопроводность жидкости, соответственно.

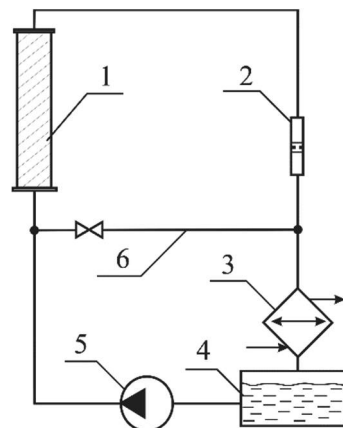


Рис. 1 Схема экспериментальной установки:
1 – рабочий участок, 2 – расходомерный участок,
3 – теплообменник, 4 – бак, 5 – насос, 6 – байпасная линия.

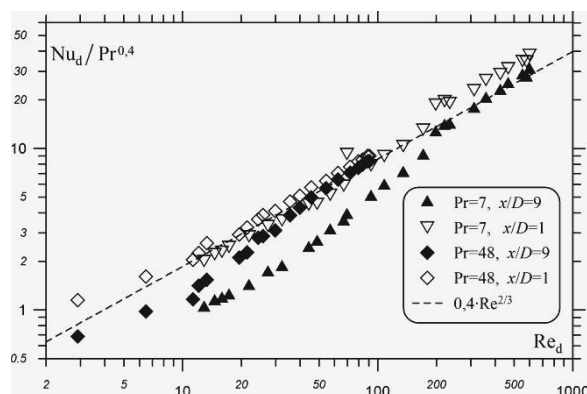


Рис.2. Теплоотдача при фильтрации жидкости.

На основании проведенных опытов установлено, что в зависимости от режима фильтрации в канале, заполненном зернистой средой, возможно существование различных законов теплообмена.

Список литературы:

1. Азров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным зернистым слоем. Л.: Химия, 1968. 510 с.
2. Богоявленский Р.Г. Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами. М.: Атомиздат, 1978. 112 с.
3. Бороздин А.В. и др. Экспериментальное исследование и численное моделирование гидродинамики и теплообмена в шаровых засыпках// Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 7. № 7. С. 295–300.
4. Kunii D., Suzuki M., Ono N. Heat transfer from wall surface to packed beds at high Reynolds number// Journal of Chemical Engineering of Japan. 1968. V. 1. P. 21–26.

Работа выполнена в рамках госзадания ИТ СО РАН

Дуников Д.О.^{1,2}, Блинов Д.В.¹¹ ОИВТ РАН,

125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2

² НИУ «МЭИ»,

111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14

Интерес к смесям метана и водорода связан с идеей использования существующей инфраструктуры природного газа для крупномасштабного хранения и транспортировки водорода. Технология Power-to-gas (PtG) призвана объединить электрическую и газовую сети, путем конверсии избыточной мощности в водород с использованием электролиза воды, подмешивания водорода к природному газу, либо получения синтетического CH_4 путем метанизации [1]. Доля водорода в природном газе может составлять от 0% до 15–20% в зависимости от местных законов и стандартов.

Извлечение водорода из обедненных смесей с метаном и природным газом отличается от традиционных промышленных методов очистки водорода. Очистка газовых смесей, содержащих 60–90% H_2 методом коротко-циклового адсорбции (PSA) в настоящее время является промышленным стандартом, однако привлекательность этого метода снижается, когда водород становится второстепенным компонентом смеси [2]. Для повышения эффективности извлечения водорода предлагается использовать сорбенты, обладающие повышенной селективностью к одному из продуктов, в том числе металлогидриды, и системы очистки водорода являются одним из направлений их практического использования [3]. Задачей нашей работы является разработка экспериментально подтвержденного способа расчета процессов в металлогидридных реакторах, позволяющего предсказывать значения коэффициента извлечения водорода из смеси, а также определять КПД процесса.

Схема металлогидридного метода очистки водорода представлена на рис. 1.

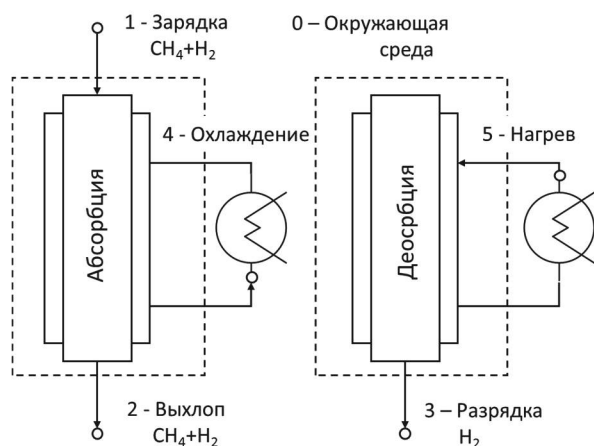


Рис. 1. Схема процесса очистки.

На вход металлогидридного реактора РХО-8и, содержащего 1 кг сплава $\text{LaNi}_{4.8}\text{Mn}_{0.3}\text{Fe}_{0.1}$, подается смесь водорода (10%) и метана с расходом до 2 норм.л/мин под давлением 0.95 МПа. Смесь про-

ходит через засыпку водородопоглощающего материала и покидает реактор через нижний штуцер. Водород селективно поглощается, теплота реакции отводится через теплообменник при 0°C. После заполнения реактора водородом, он нагревается до 80°C и начинает выделять очищенный водород. Организация экспериментальных исследований сходна с описанной в работе [4].

Термодинамический анализ показал, что коэффициент извлечения водорода из бинарной смеси по предложенной схеме можно выразить в виде:

$$\beta(t) = 1 - \frac{\int_0^t \frac{p_s(T_{MH}(t'))}{p_{in} y_1} q(t') dt'}{\int_0^t q(t') dt'}$$

где p_s – равновесное давление абсорбции, p_{in} – входное давление, y_1 – концентрация водорода в исходной смеси, T_{MH} – температура металлогидрида, q – расход водорода на входе в реактор.

В результате проведенных исследований удалось с высокой эффективностью разделить смесь с малым содержанием водорода (10%). Коэффициент извлечения водорода при абсорбции составил 76%, в полном цикле очистки (абсорбция-десорбция) – 74%, поскольку часть газа не может быть десорбирована при повышенном давлении и остается в засыпке, играя роль буферного газа. Расчет по математической модели дает значение коэффициента извлечения водорода при абсорбции 76%, что хорошо совпадает с результатами экспериментов.

Таким образом, можно заключить, что металлогидридный метод очистки водорода имеет преимущество перед методом короткоциклового адсорбции (PSA), поскольку металлогидрид селективно поглощает целевой компонент – водород, составляющий малую долю исходного потока смеси, а в PSA поглощается метан, основной компонент смеси.

Список литературы:

1. Götz M., Lefebvre J., Mörs F., McDaniel Koch A., Graf F., Bajohr S., Reimert R., Kolb T. Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review // *Renewable Energy*. 2016. Т. 85. – С. 1371–1390.
2. Sircar S., Golden T.C. Purification of Hydrogen by Pressure Swing Adsorption // *Separation Science and Technology*. 2000. Т. 35. № 5. – С. 667–687.
3. Sandrock G. A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view // *Journal of Alloys and Compounds*. 1999. Т. 293–295. – С. 877–888.
4. Blinov D.V., Borzenko V.I., Kazakov A.N. Metal hydride flow-through hydrogen purification method for renewable energy production and storage // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018.

Работы выполнены при финансовой поддержке
РФФИ (Проект 17-08-01592 А)

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ИЗОТЕРМ АБСОРБЦИИ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛОГИДРИДНОМ РЕАКТОРЕ

Дуников Д.О., Блинов Д.В.

ОИВТ РАН, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»
125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2

Определение водородопоглощающих свойств металлогидридов, диаграммы давление-концентрация-температура (РСТ) может быть непростой задачей. Измерения водородной емкости материалов на образцах разных размеров могут давать отличающиеся результаты из-за невозможности поддерживать однородность засыпки металлогидрида. Неоднородности могут возникать по разным причинам:

– тепловой эффект реакции поглощения/выделения водорода приводит к возникновению температурных градиентов, которые приводят к формированию в засыпке неоднородностей концентрации поглощенного водорода при поглощении или выделении достаточно большой порции водорода, причем такие неоднородности сохраняются даже при достижении стабильного равновесия в засыпке.

– масштабный эффект также может быть вызван напряжениями, возникающими в засыпках, ограниченных стенками реакторов. Гранулярная сепарация и взаимодействие со стенками при циклическом наводороживании приводят к образованию неоднородностей, которые влияют на равновесное давление реакции поглощения/выделения водорода.

Наши недавние исследования показали, что возникающие артефакты давления могут приводить к изменению равновесных давлений на величину до 10% [1]. Целью настоящей работы является измерение изотерм абсорбции водорода интерметаллидом $\text{LaNi}_{4.8}\text{Mn}_{0.3}\text{Fe}_{0.1}$, свойства которого известны [2] в металлогидридном реакторе РХО-3, содержащем 5 кг сплава.

Эксперименты проводились с использованием экспериментального стенда 12–04 ОИВТ РАН. Организация исследований сходна с описанной в работе [1]. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

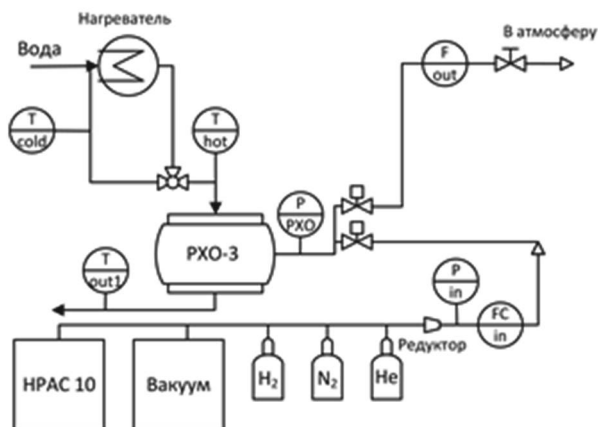


Рис. 1. Схема эксперимента: РХО-3 – металлогидридный реактор, НРАС 10 – электролизер, T – датчики температуры, P – датчики давления, FC – газовый расходомер-контроллер, F – газовый расходомер.

В ходе экспериментов была измерена изотерма абсорбции при температуре 30°C. Перед каждым измерением реактор приводился в равновесие в течение как минимум 1 часа, равновесное состояние определялось по постоянству давления в реакторе. Водород подавался на вход реактора порциями по ~50 норм.л., после чего реактор снова приводился в равновесие при новом давлении. Для устранения неоднородностей концентрации водорода в засыпке, применялся нагрев реактора до температуры 60°C или охлаждение до комнатной температуры, после чего реактор вновь приводился в равновесие при 30°C и измерялось равновесное давление.

Результаты измерений подтверждают появление артефактов давления при измерениях в изотермическом режиме. Нагрев или охлаждение засыпки приводят к перераспределению водорода в реакторе, в результате чего измеренное давление снижается.

Сравнение результатов измерения равновесных давлений в реакторе с изотермами десорбции, определенными по аппроксимации данных [2], приведено на рис. 2. Измеренные давления оказываются выше изотерм, полученных на малом образце методом Сиверса.

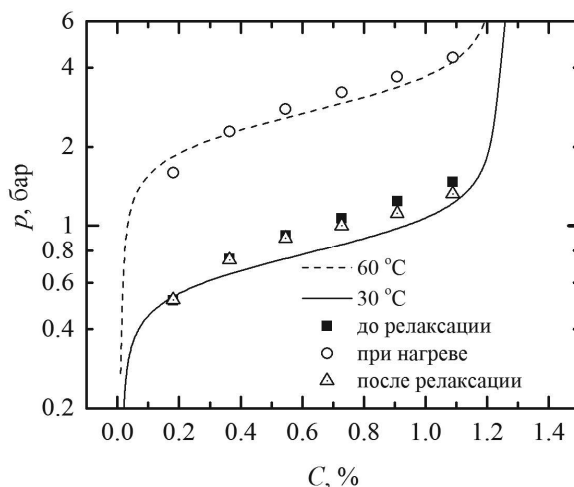


Рис. 2. Сравнение результатов измерения равновесного давления в реакторе РХО-3 с изотермами, аппроксимирующими данные [2].

Список литературы:

1. Dunikov D.O., Blinov D.V. Pressure artifacts at isothermal operation of a metal hydride tank // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. V. 44. No. 14. – P. 7422–7427
2. Малышенко С.П., Романов И.А. Исследование термодинамических свойств водородпоглощающего сплава $\text{LaFe}_{0.1}\text{Mn}_{0.3}\text{Ni}_{4.8}$ для систем ТВТ. 2014. Т. 52. № 3. – С. 415–422.

Работы выполнены при поддержке РНФ
(проект № 17-19-01738)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ СМЕСЕЙ И РАСТВОРОВ В СФЕРОИДАЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

Елистратов С.Л., Миронова Н.В.

Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Для количественных оценок физических закономерностей испарения пленок чистых жидкостей, десорбции растворов, а также сложной картины кипения многокомпонентных жидких смесей в условиях развития и смены кризисов кипения, когда испаряющаяся жидкость отделена от поверхности нагрева тонкой пленкой пара, могут быть использованы теоретические модели, отражающие отдельные стороны физической картины протекающих при этом процессов тепло – и массопереноса. В применении к чистым жидкостям физические закономерности протекания такого рода процессов изучались в работах С.С. Кутателадзе и В.М. Боришанского. Однако, эти классические результаты не могут быть использованы для описания картины кризисного испарения жидкостей, содержащих растворимые и нерастворимые примеси.

Можно предположить, что процессы нестационарного испарения растворов, а также смесей с нерастворимыми добавками должны отличаться от испарения чистых жидкостей. Увеличение со временем их концентрации в испаряющемся сфероиде может привести к изменению физической картины кризисного испарения.

На рис. 1 представлена схема задачи о нестационарном испарении плоского жидкого сфероида с начальным диаметром D_0 , соответствующим объему V_0 . Толщину сфероида в процессе испарения принимаем неизменной и равной δ . В процессе испарения с течением времени t текущие диаметр D и объем плоского сфероида V уменьшаются ($D < D_0$, $V < V_0$). Теоретически предельным является момент времени, когда из сфероида испаряется вся жидкость.

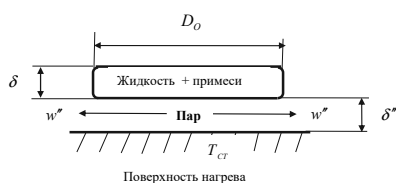


Рис. 1. Схема задачи о нестационарном испарении плоского сфероида

Пар вытекает по периферии сфероида с линейной скоростью w'' под влиянием избыточного давления:

$$\Delta p = g\delta \{ [\rho_{пр}(1-\theta) + \theta\delta'] - \rho'' \}. \quad (1)$$

В этом выражении только второй член в квадратных скобках отвечает за процесс активного испарения, в результате которого образуется динамический слой пара толщиной δ'' между сфероидом и поверхностью нагрева. Скорость истечения пара по периферии сфероида через величину суммарного теплового потока q можно определить как:

$$w'' = q \cdot D / (4r \cdot \rho'' \cdot \delta''). \quad (2)$$

Из условия динамического баланса сил, действующих на сфероид:

$$\frac{\rho''(w'')^2}{2} = \Delta p \quad (3)$$

легко определить скорость истечения пара:

$$w'' = \sqrt{2g\delta \{ [\rho_{пр}\chi + (1-\chi)\rho'] - \rho'' \} / \rho''}. \quad (4)$$

С учетом последнего выражения масса пара, вытекающего по периферии сфероида, может быть определена по выражению:

$$dG'' = \xi \pi D \delta'' \sqrt{2g\delta \{ [\rho_{пр}\chi + (1-\chi)\rho'] - \rho'' \} / \rho''} dt. \quad (5)$$

где ξ - коэффициент истечения, учитывающий форму периферийной части сфероида и характер пространственного истечения пара.

Из материального баланса сфероида следует другое выражение:

$$dG'' = (\pi/2)\rho' \cdot \delta \cdot D \cdot dD. \quad (6)$$

Из равенства (5) и (6) получаем для толщины парового слоя:

$$\delta'' = \frac{1}{\sqrt[4]{32\xi^2}} \sqrt{\frac{\lambda''(T_{ст} - T'')D}{r + c(T'' - \bar{T})}} \sqrt{g\delta \rho'' \{ [\rho_{пр}\chi + (1-\chi)\rho'] - \rho'' \}} \quad (7)$$

В выражениях (1–7) $V_{пр}$ и $\rho_{пр}$ - соответственно объем и плотность примесей; V' и ρ' - соответственно текущий объем и плотность испаряющейся жидкости; $\theta = V'/V$ и $\chi = V_{пр}/V$ - соответственно текущие объемные доли жидкости и примесей в сфероиде. При $\chi = 0$ имеем $\rho = \rho'$; испарение сфероида завершается при $V \rightarrow 0$; при завершении испарения сфероида ($\chi \rightarrow 1$) образуется осадок с объемом $V \equiv V_{пр}$.

На основе полученных нами теоретических зависимостей по испарению в сфероидальном состоянии чистых жидкостей, жидкостей, содержащих нерастворимые и ограниченно растворимые примеси, можно сформулировать условия, при наступлении которых может произойти смена кризисного режима пленочного испарения на интенсивный режим частично пузырькового кипения при контакте с поверхностью нагрева.

В качестве основной причины для водно-солевых растворов мы выделяем фактор снижения равновесной концентрации пара на нижней поверхности жидкого сфероида вследствие увеличения концентрации соли в узкой придонной части жидкого сфероида. Диффузия воды из массива сфероида к поверхности испарения через этот пограничный слой является медленным процессом. При достижении высокой концентрации раствора в этом слое, равновесное давление, а следовательно, и плотность пара в слое уменьшаются до критической величины, что сдвигает условия динамического равновесия в сторону превышения силы веса сфероида над силами трения в вязком паровом слое.

Козлов А.Н.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Одной из перспективных технологий энергетического использования древесной биомассы является газификация. Газификация представляет собой термохимический процесс частичного окисления углеводородсодержащего топлива с получением газообразного энергоносителя. Процесс газификации имеет высокую эффективность. Однако для обеспечения надежности и уровня готовности газогенераторов, соответствующих современным требованиям к энергетическим технологиям, требуются высокие капитальные и эксплуатационные расходы. Это связано с низким качеством получаемого генераторного газа и низкой стабильностью его состава в процессе газификации, что влечет за собой удорожание систем очистки газа и необходимость сложного управления работой газогенератора.

Процесс газификации проходит через стадии испарения влаги, термического разложения и взаимодействия топлива с окислителем. Для их описания необходимо знать реакционную способность топлив. Реакционная способность топлив отражает их химическую активность в процессе окисления. Количественной характеристикой реакционной способности являются кинетические коэффициенты изучаемых процессов, например, кинетики пиролиза, выхода летучих. При этом следует учитывать специфические для каждого вида топлива кинетические механизмы, описание которых основано на детальной кинетической теории полного сжигания качественного топлива. Применение этой теории к описанию процесса газификации топлива с высоким содержанием кислорода в составе приводит к значительной вариабельности кинетических параметров, определяющих реакционную способность. Это обусловлено недостатком теоретических представлений о механизме гетерофазных взаимодействий и, как следствие, приводит к использованию большого количества допущений для реалистического описания процессов газификации.

Распространенный способ изучения механизмов и кинетики термохимической конверсии древесной биомассы является термический анализ. Условием использования термического анализа является то, что через некоторое время после начала нагрева устанавливается регулярный режим, при котором скорость нагрева образца равна скорости нагрева внешней среды, что обеспечивает наиболее простые связи между характеристиками термоаналитических кривых и различными теплофизическими и кинетическими величинами. При правильно выбранных условиях проведения термического анализа устанавливается преимущественно кинетический режим горения, а кинетические кинетические коэффициенты можно определять непосредственно по экспериментальным данным.

Кинетический анализ термохимической конверсии древесной биомассы проводили с использованием сопряженного комплекса синхронного термического STA 449 и квадрупольного масс-спектрометра QMS 403 Aeolos (NETZSCH, Германия). В экспериментах варьировалась скорость нагрева и газовый состав реагирующей среды (инертная, воздушная, углекислотная). При определении кинетических коэффициентов решали обратную задачу.

Алгоритм определения кинетических коэффициентов был следующим. На первом этапе определяли стадииные основных процессов термохимической конверсии с использованием безмодельного (model-free) кинетического анализа. При этом использовалось допущение об одностадийности процесса. Далее рассчитанные коэффициенты были применены в качестве входных данных для кинетического анализа с предположением модели (model-fitting). В результате исследования были установлен механизм и рассчитаны кинетические коэффициенты для описания процессов термохимической конверсии древесной биомассы. В результате было установлено, что скорость сушки не зависит от состава реагирующей среды, а зависит только от начального влагосодержания в исходной биомассе. На стадии выхода летучих возникает диффузионное ограничение, препятствующее доступу окислителя к поверхности частиц топлива, поэтому конверсия органической массы происходит за счет пиролитических процессов. Скорость углекислотной конверсии биомассы на стадии конверсии древесного угля представлена на рис.1. Рис.1 показывает, что наблюдаемый изгиб на кривой обусловлен сменой кинетического режима на диффузионный режим гетерогенного горения.

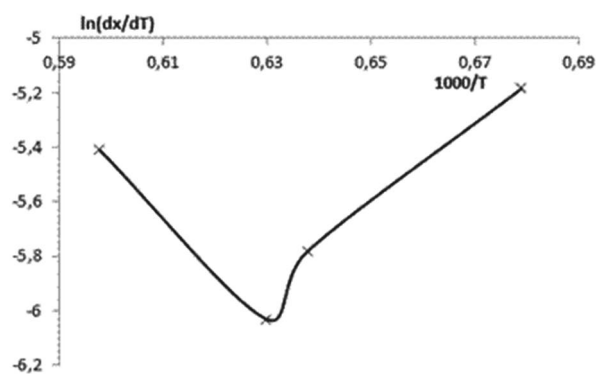


Рис.1. Зависимость скорости реакции углекислотной конверсии древесного угля от температуры процесса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10025)

МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СЕЗОННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД В СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЕ

Кубряков А.И., Белокопытов В.Н.

ФГБУН Морской гидрофизический институт РАН,
299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2

Перспективы устойчивого экономического роста Севастополя в значительной степени связаны с развитием морехозяйственного комплекса, в частности, с использованием транспортного, рекреационного и рыбопромышленного потенциалов Севастопольской бухты. Бухта и её прибрежные зоны относятся к акваториям активной хозяйственной деятельности. Следствием этого является интенсивная антропогенная нагрузка на прибрежные акватории бухты, стремительно возрастающая в последние десятилетия, и связанный с ней рост вероятности крупных катастроф с нанесением непоправимого ущерба рекреационным и биологическим ресурсам моря. Для обеспечения сохранности водных ресурсов бухты необходимо создание систем контроля морской среды, неотъемлемой частью которых являются междисциплинарные математические модели, описывающие состояние и динамику морских прибрежных вод. Гидродинамический блок в таких системах составляет основную часть, а модели, лежащие в его основе, должны учитывать специфические особенности прибрежных морских зон, в частности, бухт и заливов. Сложность и разнообразие процессов в прибрежной зоне вызывают необходимость разработки и применения при их исследовании современных моделей высокого уровня, основанных на нелинейных дифференциальных уравнениях в частных производных, описывающих эволюцию трехмерных гидрофизических полей, и использующих адекватные параметризации подсчетных физических процессов.

Версия модели циркуляции Принстонского университета – ROM [1], адаптированная к прибрежным районам Черного моря [2], используется для восстановления климатической сезонной эволюции термохалинной структуры и циркуляции Севастопольской бухты как отклик на годовой ход ветрового воздействия, потоков тепла на поверхности моря и речного стока. Модель основана на полной системе уравнений термодинамики океана со свободной поверхностью в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости жидкости в σ -координатах. Размеры расчетной сетки по горизонтали составляли около 40 м по долготе и 20 м по широте, по вертикали использовалось 11 σ -уровней. На открытой жидкой границе задавались среднемесячные климатические значения температуры и солёности, подготовленные по данным 2709 гидрологических станций в период с 1923 по 2014 гг. Данные о составляющих внешнего теплового баланса поверхности моря, были взяты из массива глобального реанализа атмосферных полей ERA-40 [3]. Климатические данные об осадках, ветре и речном стоке оценивались по данным наблюдений на Севастопольской гидрометеостанции. В качестве начальных полей использова-

лись климатические среднеянварские поля температуры и солёности.

Модель достаточно быстро выходит на квазипериодический годовой режим. Изменчивость ветрового воздействия во время сезонного цикла порождает различия в структуре горизонтальной и вертикальной циркуляции в течение года, модифицирует водообмен между бухтой и открытым морем, а также между многочисленными внутренними бухтами. В то же время генеральная картина водообмена, обусловленная стоком пресных вод реки Черной, остается неизменной: в верхних слоях течения направлены, в основном, из бухты в открытое море, в придонных же слоях вода из открытого моря втекает в бухту. Максимум поверхностной скорости течений имеет место в феврале-марте, когда наблюдается максимальный приход холодной и пресной речной воды в бухту. В весенний и летний сезоны у входа в бухту по всей ширине образуется интенсивный антициклонический вихрь. В течение года во внутренних бухтах образуются локальные мезомасштабные вихри. Зимой воды бухты, благодаря конвекции, перемешаны до дна. Летний прогрев провоцирует формирование острого термоклина. Во время зимней эрозии термоклина поток вытекающих из бухты вод занимает более обширный слой.

На основе инкорпорированной в модель циркуляции модели переноса/диффузии проделаны сценарные расчеты распространения загрязняющей примеси.

Выполненные численные эксперименты показали работоспособность разработанной модели, что позволяет в дальнейшем планировать проведение прогнозных расчетов изменчивости морской среды бухты при реальном внешнем воздействии, а также использование модели в качестве инструмента для решения различного рода инженерных и экологических задач, таких как распространение загрязняющих веществ, перенос взвеси, потоки питательных веществ и т. д.

Список литературы:

1. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of a three-dimensional coastal ocean model. In: N. Heaps, Three Dimensional Shelf Models, Coastal Estuarine Sci. Washington D.C. AGU. –1987. –Vol. 5, – p. 1–16.
2. Kubryakov A.I., Korotaev G.K., et al. Black Sea coastal forecasting system // Ocean Sci. –2012. –8,–p. 183–196. doi:10.5194/os-8-183-2012.
3. Uppala, S.M., Kållberg, et al. 2005: The ERA-40 re-analysis. Quart. J. R. Meteorol. Soc., 131, 2961–3012. doi:10.1256/qj.04.176.

*Работа выполнена при поддержке РФФ,
грант № 17-77-30001*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ КАПЕЛЬ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ВСЛЕДСТВИЕ РАЗРУШЕНИЯ ЖИДКОСТНЫХ МАССИВОВ

Кузнецов Г.В., Стрижак П.А., Войтков И.С., Волков Р.С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

Для локализации крупных лесных пожаров чаще всего используется пожарная авиация. Данный способ подразумевает сброс воды с борта самолета (водная бомбардировка). Основными недостатками использования авиации для тушения пожаров являются: длительный интервал между вылетами; высокие эксплуатационные расходы; неравномерное распределение тушащей жидкости в зоне пожара.

Несмотря на большое практическое значение, вопрос о рациональном использовании объема тушащей среды изучен не в полной мере. Согласно современным представлениям о процессах тушения пожаров можно сделать выводы о том, что крайне важно интенсифицировать процессы испарения капель воды за счет поиска оптимальных характеристик (размера капель, высоты сброса, их скорости др.) распыла [1–2].

Поэтому, для нахождения данных характеристик необходимо провести экспериментальные исследования по определению размеров капель, образующихся вследствие разрушения жидкостных массивов.

Расчета производился по результатам полевых испытаний. Объем массивов составил $V \approx 0,5$ л. В качестве жидкости для создания массивов использовалась вода без примесей.

По результатам анализа выполненных исследований рассчитывались:

- средний радиус образовавшихся капель (r , мм);
- количество образовавшихся капель (N);
- количественная концентрация образовавшихся капель ($N(n)$, %);
- объемная концентрация образовавшихся капель ($N(v)$, %).

Для обработки результатов использовалось ПО «ActualFlow», применялся метод анализа теневых изображений с предварительной фильтрацией и алгоритмом определения границ капель. Для этого полученные в ходе испытаний видеозаписи представлялись в виде последовательности кадров, после чего полученные изображения подвергались обработке. В ходе последней капли делились на несколько групп, далее определялось количество (N_i) капель для каждой группы размеров (r_i). При расчете параметров $N(n)$ и $N(v)$ использовались формулы

$$N(n) = N_i / \sum N_i \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$N(v) = V_i / V \cdot 100\%, \quad (2)$$

где: N_i – количество капель каждой группы размеров; $\sum N_i$ – суммарное количество образовавшихся капель; $V_i = 4/3 \cdot \pi \cdot r_i^3 \cdot N_i$ – суммарный объем капель каждой группы размеров, л; V – начальный объем жидкостного массива, л.

На рис. 1 приведены исходные и обработанные видеogramмы выполненных экспериментов.

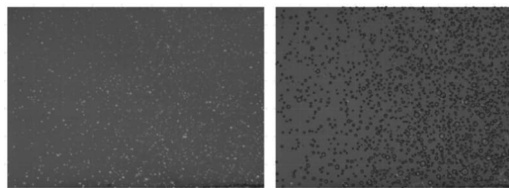


Рис. 1. Исходные видеogramмы экспериментов (слева) и видеogramмы с идентифицированными (справа) каплями/фрагментами жидкостного массива ($V \approx 0,5$ л; пройденное расстояние – 10 м.

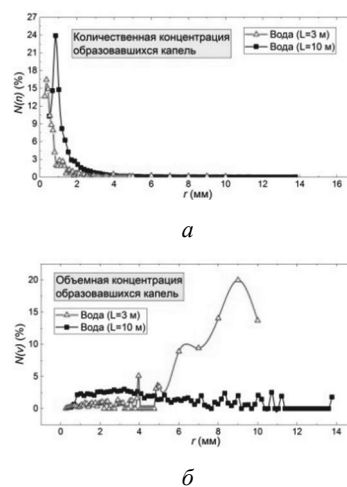


Рис. 2. Зависимости $N(n)=f(r)$ и $N(v)=f(r)$ для воды для различных пройденных расстояний ($V \approx 0,5$ л): а – количественная концентрация образовавшихся капель ($N(n)$); б – объемная концентрация образовавшихся капель ($N(v)$).

На основании полученных зависимостей (рис. 2.), можно обеспечить оптимальные параметры распыла (размер капель, высота сброса, скорости и т.д.) сбрасываемой воды. Становится возможным определение минимального размера капель на входе в зону горения для предотвращения их унос и интенсификации процессов испарения капель воды, за счет уменьшения размера капель [3].

Список литературы:

1. Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Трансформация массивов растворов и суспензий при свободном падении в воздухе // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51. № 6. С. 712–719.
2. Zhdanova A. O., Volkov R. S., Voytkov I. S., Osipov K. Yu., Kuznetsov G. V. Suppression of forest fuel thermolysis by water mist // International Journal of Heat Mass Transfer. 2018. V. 126 P. 703–714.
3. Войтков И.С., Забелин М.В., Высокоморная О.В. Торможение и разворот капель воды во встречном потоке продуктов сгорания горючих жидкостей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2017. № 4. С. 27–32.

Работа поддержана РФФ (грант No. 18-19-00056)

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ МАНДАРИНОВОЙ ЦЕДРЫ В СОСТАВЕ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ КАМЕННОГО УГЛЯ

Кузнецов Г.В., Толокольников А.А., Чередник И.В., Янковский С.А.

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: Jankovsky@tpu.ru

Проведен анализ возможности использования переработки мандариновой цедры в смеси с каменным углем марки Т (Тошгий) в качестве топлива водогрейных котлов. Экспериментально определены технические характеристики, а также условия и времена задержек зажигания таких смесевых топлив при различной массовой концентрации исходных компонент. Навески частиц угля и мандариновой цедры помещались в оцинкованный барабан планетарной мельницы Pulverisette 6 с шарообразными (металл – сталь) мелющими телами диаметром 5 мм в массовом соотношении 1:1. Процесс смешения осуществлялся при скорости вращения 500 об/мин в течении семи минут [1]. В экспериментальных исследованиях использовались каменный уголь марки Т (месторождение «Алардинское») размер частиц составлял не более 80 мкм. Второй компонентой были пищевые отходы «Мандариновая цедра» (размер частиц менее 200 мкм). Эксперименты проведены в среде воздуха при температурах от 600 °С до 800 °С. Регистрация процессов зажигания и горения навесок смесевых топлив проводилась с использованием скоростной видеокамеры (форматом изображения – 1024×1024 пикселей, частотой кадров – до 105 в секунду), обеспечивающей высокую дискретизацию результатов регистрации характерных времен процессов [1]. Выявлен температурный предел устойчивого зажигания таких топлив. Установлено, что увеличение доли мандариновой цедры в смеси приводит к ускорению процессов зажигания исследовавшихся смесевых топлив. Обоснована возможность использования в малой энергетике топливных смесей на основе каменных углей и пищевых отходов.

Технические характеристики исследуемых навесок смесевых топлив определялись согласно стандартным методам [2] и приведены в таблице 1.

Таблица 1 Элементный состав и технические характеристики исходных топливных компонент (теплота сгорания, влажность, зольности, выход летучих) исследовавшихся смесей.

Топливо (мандариновая цедра/ уголь_марка), %	Технический анализ, %			Теплота сгорания, Q, МДж/кг
	W _a	A ^d	V ^{daf}	
100/0	5,61	1,89	80,41	16,79
0/100 Т	5,61	18,37	24,93	25,72
10/90 Т	5,61	15,23	29,49	23,32
25/75 Т	5,61	13,38	38,99	22,17
50/50 Т	5,61	9,10	55,22	20,20

Анализ приведенных в таблице 1 результатов экспериментов позволяет установить синергетический (не аддитивный) эффект снижения зольности и увеличения выхода летучих веществ исследовавшихся смесей

в зависимости от концентрации древесной компоненты. Эти характеристики являются одними из основных при сжигании топлив в топках энергетических котлов. Для смесевых топлив на основе угля марки Т, увеличение доли древесины до 50% приводит к снижению зольности с 18,37% до 9,10. Выход летучих веществ увеличивается с 24,93% (однородный уголь Т) до 55,22%.

На рисунке 1 представлены зависимости времен задержек зажигания навесок топливных смесей.

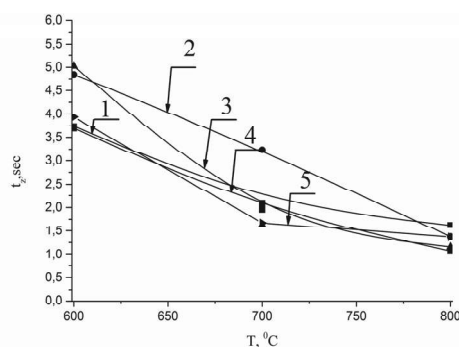


Рис. 1. Зависимость времен задержки зажигания смесевых топлив на основе угля марки Т от температуры при разных концентрациях мандариновой цедры: 1 – уголь; 2 – смесь с содержанием угля 90%; 3 – смесь с содержанием угля 75%; 4 – смесь с содержанием угля 50%; 5 – мандариновая цедра.

Как видно из рисунка 1 при увеличении температуры от 600 °С до 800 °С для однородного угля марки Т время задержки зажигания снижается в 2,3 раза, а для мандариновой цедры в 2,9 раз. При увеличении доли мандариновой компоненты до 50% время задержки зажигания смесевых топлив уменьшилось в 3,4 раза с ростом температуры от 600 °С до 800 °С. Можно сделать вывод, что с увеличением доли мандариновой компоненты в смесевом топливе на основе угля марки Т процесс инициирования зажигания таких смесевых топлив с увеличением температуры внешней среды ускоряется существенно.

Список литературы:

1. Kuznetsov G.V., Yankovskii S.A. Conditions and characteristics in ignition of composite fuels based on coal with the addition of wood // Thermal Engineering, 2019, Vol. 66, No. 2, pp. 133–137.
2. Li Q., Lin Y., Exergy analysis of the LFC process // Proc. International Heat, 2016, V.108, P.348–354.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, в рамках реализации проекта №13.7644.2017/БЧ

ЗАЖИГАНИЕ ПЕЛЛЕТИРОВАННЫХ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ БУРОГО УГЛЯ И ОТХОДОВ ЛЕСОПИЛЕНИЯ

Кузнецов Г.В., Чередник И.В., Толокольников А.А., Янковский С.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

e-mail: Jankovsky@tpu.ru

Выполнен анализ возможности утилизации отходов лесопиления при сжигании пеллет в смеси с углем. Экспериментально определены условия и характеристики зажигания гранул топливных смесей на основе угольной пыли и мелкодисперсной древесины при различных массовых концентрациях топливных компонент. Топливные гранулы изготавливались методом холодного прессования на гидравлическом прессе. Эксперименты проведены в среде нагретого до высоких (от 600 °С до 800 °С) температур неподвижного воздуха. Регистрация процессов нагрева исследовавшихся гранул смесевых топлив, их последующего зажигания и горения проводилась с использованием скоростной видеокамеры (форматом изображения – 1024×1024 пикселей, частотой кадров – до 10⁵ в секунду), обеспечивающей высокую дискретизацию результатов регистрации характерных времен процессов. Установлено, что рост доли древесной компоненты в топливной грануле существенно снижает численные значения времен задержки зажигания всех исследовавшихся смесей на основе бурого угля марки ЗБ. Выявлен предел устойчивого зажигания таких топлив 600 °С [1]. В экспериментальных исследованиях использовался бурый уголь марки ЗБ (месторождение «Балахтинское») размер частиц составлял не более 80 мкм. Второй компонентой были отходы лесопиления (размер частиц менее 200 мкм). Определение технических характеристик исследовавшихся смесевых топлив (калорийности, зольности, влажности и выхода летучих) проходило после предварительной подготовки обеих компонент [2].

Таблица 1. Результаты анализа элементного состава исходных топливных компонент (теплота сгорания, влажность, зольности и выход летучих исследуемых топливных смесей).

Топливо (древесина/ уголь_марка), %	Технический анализ, %			Теплота сгорания, Q, МДж/кг
	W _a	A ^d	V ^{daf}	
100 / 0	5,35	0,29	80,25	21,73
0 / 100 ЗБ	5,41	3,45	40,09	25,79
10 / 90 ЗБ	8,82	3,2	44,89	23,91
25 / 75 ЗБ	14,21	3,11	47,41	23,83
50 / 50 ЗБ	12,87	2,75	54,75	23,75

Анализ приведенных в таблице 1 результатов экспериментов позволяет установить синергетический (не аддитивный) эффект снижения зольности и увеличения выхода летучих веществ исследовавшихся смесей в зависимости от концентрации древесной компоненты. Полученные характеристики являются одними из основных при сжигании топлив в водогрейных котлах. Для смесевых топлив на основе угля

марки ЗБ, увеличение доли биомассы до 50% приводит к снижению зольности с 3,45 до 2,75%. Выход летучих веществ увеличивается с 40,09% (однородный уголь марки ЗБ) до 54,75%.

На рисунке 1 приведены результаты экспериментов в виде зависимости $t_3(T)$ от температуры внешней среды для гранул смесевых топлив на основе угля марки ЗБ и биомассы.

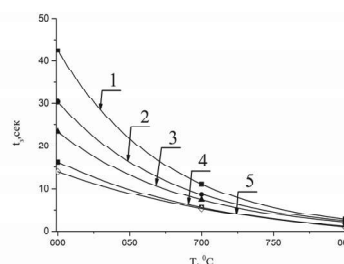


Рис. 1. Зависимости времен задержки зажигания гранул угля, древесины и смесей топлив на основе угля марки ЗБ от температуры при разных концентрациях древесной компоненты: 1 – однородный уголь; 2 – смесь с содержанием угля 90%; 3 – смесь с содержанием угля 75%; 4 – смесь с содержанием угля 50%; 5 – однородная древесина

Анализ рисунка 1 позволяет оценить влияние температуры на времена задержки зажигания гранул смесевых топлив на основе угля марки ЗБ и древесной биомассы. Увеличение температуры в камере сгорания до 800 °С приводит к снижению значения времен задержки зажигания до 2,75 с для однородного угля и до 1,12 с гранулы смесового топлива в соотношении компонент 50/50%.

Полученные результаты отражают возможность использования гранул смесевых топлив на основе измельченных углей и древесины при слоевом сжигании в котлоагрегатах угольных ТЭС, а также водогрейных котлов. Применение древесной компоненты в смесевом топливе существенно снижает затраты на предварительный нагрев топочного пространства при незначительном снижении энергетических характеристик используемых гранул смесевых топлив по отношению к однородным углям.

Список литературы:

- Geniy V. Kuznetsov, Stanislav A. Jankovsky, Anton A. Tolokolnikov & Andrey V. Zenkov. Mechanism of Sulfur and Nitrogen Oxides Suppression in Combustion Products of Mixed Fuels Based on Coal and Wood // Combustion Science and Technology, 2018, pp 1–12. DOI: 10.1080/00102202.2018.1543285.
- Li Q., Lin Y., Exergy analysis of the LFC process // Proc. International Heat, 2016, V.108, P.348–354.

Исследование выполнено при финансовой поддержке
РФФИ грант № 18-29-24099\18

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕМНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ НА КРАЕВОЙ УГОЛ СМАЧИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НАНОЖИДКОСТЬЮ

Лобасов А.С.^{1,2}, Минаков А.В.^{1,2}, Пряжников М.И.^{1,2}

¹ Сибирский федеральный университет,
660074, Россия, Красноярск, пр. Киренского, 28

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Нефтедобывающая отрасль как одна из основных в нефтегазовой индустрии является одной из важнейших отраслей экономики не только Российской Федерации, но и многих зарубежных стран. Постепенное истощение месторождений нефти происходит повсеместно, поэтому становятся актуальными вопросы разработки и применения новых технологий нефтедобычи, позволяющих значительно увеличить нефтеотдачу уже разрабатываемых пластов, а также использовавшихся и законсервированных месторождений, на которых традиционными методами извлечь значительные остаточные запасы нефти уже невозможно. В настоящее время нефть из пористой породы вытесняют при помощи воды, однако коэффициент извлечения нефти водой остается достаточно низким. Средняя конечная нефтеотдача пластов по различным странам и регионам составляет 25–40%. Использование наножидкостей позволяет интенсифицировать нефтеотдачу [1–3]. Одной из причин значительного увеличения коэффициента извлечения нефти с помощью наножидкостей является изменение смачиваемости породы, способствующее вымыванию как пленочной, так и капиллярно-удержанной нефти. Поэтому проведение систематических исследований применения наножидкостей при эксплуатации нефтяных скважин является чрезвычайно актуальным для нефтегазовой индустрии.

В данной работе было проведено экспериментальное исследование зависимости контактного угла смачивания между подложкой и наножидкостью. Наножидкость была приготовлена на основе дистиллированной воды и наночастиц оксида алюминия (Al_2O_3) со средними размерами наночастиц 43 нм. Наночастицы были приобретены у компании «Плазмотерм», г. Москва. Объемная концентрация наночастиц варьировалась от 0.0625 до 1%. Для приготовления наножидкости применялся стандартный двухшаговый метод. После добавления в воду необходимого количества нанопорошка емкость с наножидкостью помещалась в ультразвуковую ванну «Сапфир» для разрушения конгломератов наночастиц. Время ультразвукового диспергирования порошков в воде составляло 30 минут. В качестве материала подложки в данном исследовании использовался метабазацит.

Измерение краевого угла смачивания проводилось с помощью автоматического тензиометра IFT-820-P, принцип действия которого основан на методе лежащей капли. Конструктивно тензиометр состоит из измерительного блока с оптической ячейкой, термостата, системы дозирования жидкости, системы управления давлением, интерфейса для внешнего компьютера, программного обеспечения DropImage Advanced. Управление режимом измерения, процессом формирования капли, обработка результатов измерений осуществляется с помощью компьютера.

Изображение капли, размеры, результаты расчетов выводятся на монитор. Ячейка IFT-820-P работает при величинах давления до 68.95 МПа и температуры до 176°C. Для наблюдения за формированием нефтяной капли и измерения параметров капли используется камера gamé-hart.

В результате проведенного исследования было установлено, что краевой угол смачивания нелинейно зависит от объемной концентрации наночастиц, как это видно из рис. 1. Также из этого рисунка можно видеть, что значение краевого угла сначала резко увеличивается, достигая максимального значения при объемной концентрации 0.0625%, а затем начинает уменьшаться. Таким образом можно сделать вывод, что использование наножидкостей позволяет модифицировать краевой угол смачивания, и, тем самым, даёт возможность управлять процессами извлечения нефти и повышать эффективность её добычи.

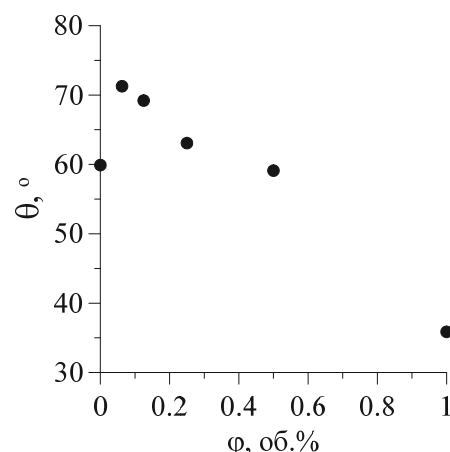


Рис. 1. Зависимость краевого угла смачивания наножидкостью подложки из метабазацита от объемной концентрации наночастиц оксида алюминия (Al_2O_3).

Список литературы:

1. Wasan D., Nikolov A., Kondiparty K. The wetting and spreading of nanofluids on solids: Role of the structural disjoining pressure // Curr. Opin. Colloid Interface Sci., 2011, Vol. 16, Is. 4, P. 344–349.
2. Torsater O., Li S., Hendraningrat L. Enhancing oil recovery of low-permeability Berea sandstone through optimised nanofluids concentration // Society of Petroleum Engineers, 2013, art. No. SPE-165283-MS.
3. Torsater O., Li S., Hendraningrat L. Effect of some parameters influencing enhanced oil recovery process using silica nanoparticles: An experimental investigation // Society of Petroleum Engineers, 2013, art. No. SPE-165955-MS.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 17-79-20218 «Применение наножидкостей в технологиях разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений»

ОХЛАЖДЕНИЕ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ДИСПЕРГИРОВАННЫМ ПОТОКОМ

Мирнов С.В.^{1,2}, Комов А.Т.¹, Варава А.Н.¹, Дедов А.В.¹, Люблинский И.Е.³, Вертков А.В.³,
Захаренков А.В.¹, Локтионов В.Д.¹, Сморгкова Ю.В.¹

¹ ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»,
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная, 14

² АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,
142190, Москва, Троицк, ул. Пушкиных вл. 12

³ АО «Красная звезда»,
115230, Москва, Электролитный пр., 1А

Одной из проблем, которые предстоит решать при создании стационарного термоядерного токамака-реактора, является разработка конструкций его внутрикамерных элементов (ВЭ). Конструктивные элементы первой стенки термоядерного реактора подвергаются разрушительному воздействию нейтронного потока с энергией 14,1 МэВ, высокотемпературной плазмы с энергией десятки кэВ, электромагнитного и теплового излучения. Все это приводит к деградации структуры и распылению материала структур, обращенных к плазме. На сегодняшний день традиционные конструкторские решения и материалы (в том числе тугоплавкие) не могут обеспечить создание ВЭ, способного выдерживать воздействие тепловых потоков плотностью 10–20 МВт/м² в течение коммерчески приемлемого периода эксплуатации.

Альтернативным решением этой проблемы является использование капиллярно-пористых структур (КПС), насыщенных жидкими металлами с низким (например, Li) или с высоким числом Z, но низким давлением пара (например, Sn). Это позволит создать долгоживущую, не повреждаемую и самообновляющуюся поверхность внутрикамерных элементов, которая оказывает незначительное загрязняющее влияние на плазму [1–2].

Одной из основных проблем, возникающих при использовании жидкого металла, является выбор схемы охлаждения ВЭ и вида теплоносителя, который бы отвечал требованиям безопасности, предъявляемым к термоядерному реактору.

В качестве перспективного метода теплосъема можно рассматривать применение литиевых КПС со стороны ВЭ, обращенной в плазму, и охлаждением мелкодисперсной смесью воды и газа. При таком подходе система работает при низком давлении, удельное объемное содержание воды в теплоносителе не превышает 10% и может легко регулироваться. Конструктивно система проста и может быть изготовлена из обычных нержавеющей сталей аустенитного класса типа X18H10T.

Для работы в этом направлении авторами был создан замкнутый гидравлический контур (см. рис. 1) для охлаждения обогреваемого рабочего участка 1. Циркуляция воды обеспечивается водяным насосом 13, газодисперсный поток формируется генератором (форсунка 2 на схеме).

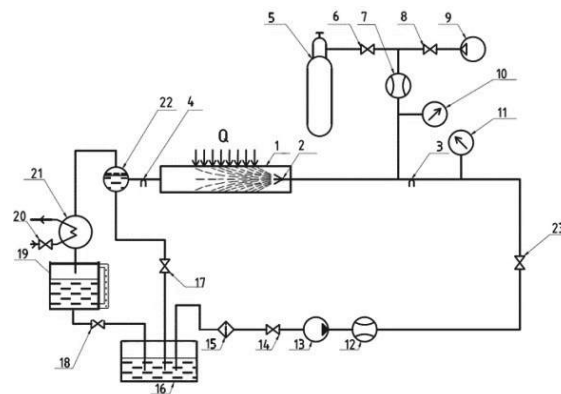


Рис. 1. Схема гидравлического контура для охлаждения рабочего участка: 1 – обогреваемый рабочий участок, 2 – форсунка (генератор газодисперсного спрея), 3 – термодатчик на входе в РУ, 4 – термодатчик на выходе из РУ, 5 – баллон с рабочим газом, 6, 8, 14, 23 – вентили регулирующие расход компонентов, 17, 18, 20 – вентили запорные проходные, 7 – расходомер газового потока, 9 – компрессор, 10 – манометр давления газа на входе в форсунку, 11 – манометр давления воды на входе в РУ, 12 – расходомер водяного потока, 13 – насос водяной, 15 – фильтр очистки, 16 – бак, 19 – мерная емкость, 21 – конденсатор, 22 – сепаратор.

Экспериментальные исследования проводились в следующем диапазоне режимных параметров: давление воды $p_{\text{воды}} = (1,0 \div 3,5) \cdot 10^5$ Па, давление воздуха $p_{\text{возд}} = (1,0 \div 4,0) \cdot 10^5$ Па, массовый расход воды $G_{\text{воды}} = 0,025 \div 0,058$ кг/с, массовый расход воздуха $G_{\text{возд}} = 0,001 \div 0,0023$ кг/с, плотность теплового потока на стенке мишени $q = 1 \div 8$ МВт/м².

Первичный анализ полученных результатов показал эффективность данного метода охлаждения. Вместе с тем, по мнению авторов, целесообразно продолжить подобные детальные исследования.

Список литературы:

1. Mirmov S.V. and others, Experimental test of the system of vertical and longitudinal lithium limiters on T-11M tokamak as a prototype of plasma facing components of a steady-state fusion neutron source // Nuclear Fusion. 2015. vol. 55 issue 12. 123015.
2. Vertkov A.V., Lyublinski, I. E. Experience in the Development of Liquid Metal Plasma Facing Elements Based on Capillary-Porous Structures for a Steady-State Tokamak (Survey) // Physics of Atomic Nuclei. 2018. vol. 81. Issue 7. pp 1000–1007.

Работа выполняется при финансовой поддержке гранта РНФ 16-19-10457-П

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НИСХОДЯЩЕГО ПАРОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА В СТВОЛЕ НАГНЕТАТЕЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ

Мусакаев Н.Г.^{1,2}, Бородин С.Л.¹

¹ Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, 625026, Россия, Тюмень, ул. Таймырская, 74

² Тюменский индустриальный университет, 625000, Россия, Тюмень, ул. Володарского, 38

Важной составляющей мировой сырьевой базы являются залежи высоковязких и битумных нефтей (тяжелые нефти) [1, 2]. Ряд отечественных нефтедобывающих компаний проводят исследования по выработке способов и мероприятий, направленных на экономически обоснованную добычу углеводородного сырья из таких месторождений [3, 4].

Одними из известных методов повышения нефтеотдачи пластов являются термические методы, к числу которых относится метод воздействия на нефтенасыщенные пласты теплоносителями (горячая вода или пар) [2, 3, 5, 6]. При этом важным моментом является расчет параметров течения горячей двухфазной смеси по стволу нагнетательной скважины [7].

В настоящее время для расчета показателей разработки месторождений и обоснования наиболее эффективных технологий теплового воздействия на нефтенасыщенные пласты зачастую применяется математическое моделирование. Анализ процессов, происходящих в стволе нагнетательной скважины и окружающих ее горных пород (в том числе и многолетнемерзлых пород), позволяет лучше понять физическую сущность тепловых методов, что необходимо при проектировании и практической реализации этих сложных технологий на нефтяных месторождениях.

В работе для нахождения по глубине скважины основных параметров течения горячей парожидкостной смеси в стволе нагнетательной скважины получена система дифференциальных уравнений, включающая в себя уравнения сохранения масс, импульсов и энергии [8, 9]. Для решения задачи внешнего теплообмена скважины с окружающей горной породой записаны уравнения теплопроводности для протаявшей и мерзлой пород, условие на границе контакта скважины с протаявшей породой, условие на границе фазовых переходов в многолетнемерзлых породах, уравнение движения фронта протаивания мерзлой породы. Предложен алгоритм для решения данной квазистационарной задачи. Проведена серия вычислительных экспериментов по нахождению параметров нисходящего парожидкостного потока по стволу нагнетательной скважине с учетом превентивных способов снижения тепловых потерь от скважины в окружающие горные породы. Пример такого расчета представлен на рис. 1

Список литературы:

1. Антониади Д.Г. Научные основы разработки нефтяных месторождений термическими методами. М.: Недра, 1995. 264 с.
2. Бурже Ж., Сурио П., Комбарну М. Термические методы повышения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1989. 422 с.
3. Шагапов В.Ш., Юмагулова Ю.А., Гиззатуллина А.А. Фильтрация высоковязкой нефти в пласте при тепловом воздей-

ствии // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91, № 2. С. 319–328.

4. Косяков В.П., Зеленин Д.В. Совершенствование методики ТатНИПИнефть для расчёта нефтеотдачи на месторождениях с трещиновато-поровым типом коллектора с учетом закачки горячей воды // Нефтепромысловое дело. 2015. № 11. С. 21–24.
5. Малофеев Г.Е., Мирсаатов О.М., Чоловская И.Д. Нагнетание в пласт теплоносителей для интенсификации добычи нефти и увеличения нефтеотдачи. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2008. 220 с.
6. Пятков А.А., Косяков В.П. Исследование процессов фильтрации высоковязкой нефти в трещиновато-пористом коллекторе // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Т. 3, № 3. С. 40–51.
7. Кутушев А.Г., Русанов А.С. Неизотермическое движение парожидкостной смеси в скважине // Известия вузов. Нефть и газ. 2008. № 4. С. 39–45.
8. Губайдуллин А.А., Мусакаев Н.Г., Бородин С.Л. Математическая модель восходящего газожидкостного потока в вертикальной скважине // Вестник Тюменского государственного университета. – 2010. – № 6. – С.68–75.
9. Musakaev N.G., Borodin S.L. Mathematical model of the two-phase flow in a vertical well with an electric centrifugal pump located in the permafrost region // Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 52, No. 5. P. 981–991.

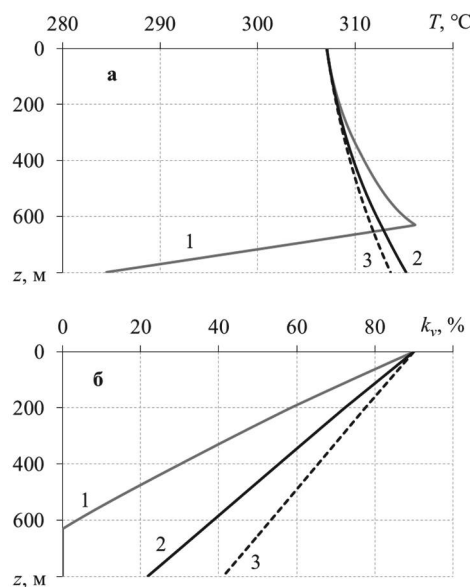


Рис. 1. Распределение по координате z температуры двухфазного потока (а) и массовой концентрации пара (б). Линии 1, 2 и 3 соответствуют толщине теплоизоляции на внешней поверхности подъемной колонны скважины $h=0$, 2 и 4 мм, коэффициент теплопроводности теплоизолирующего материала $\lambda=0,02 \text{ кг}\cdot\text{м}/(\text{с}^3\cdot\text{К})$. Время эксплуатации скважины составляет 1 сутки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00049)

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СМЕСИ МЕТАНА, ПРОПАНА И БУТАНА НА ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

Назарычев С.А., Сайфуллин Э.Р., Ларионов В.М.

Казанский федеральный университет,
420008, Казань, ул. Кремлёвская, 18

В современной энергетике основным топливом для выработки тепловой и электрической энергии является природный газ. Его потребление с каждым годом растет и в перспективе проблема ресурсосбережения станет чрезвычайно актуальной. В настоящее время ведутся исследования по использованию альтернативных топлив: попутный нефтяной газ, отходы нефтехимических производств, свалочный газ, синтез газ и др. Такой подход позволит решить и другую проблему – экологическую, связанную с утилизацией промышленных и бытовых отходов. Однако, непостоянство состава таких топлив, и, как следствие, их теплотехнических характеристик приводит к нестабильной работе энергетических установок [1]. Поэтому исследование процессов горения и теплообмена в установках, использующих углеводородное топливо переменного состава – актуальная задача.

Была создана лабораторная водонагревательная установка, состоящая из цилиндрической камеры сгорания предварительно подготовленной смеси топлива и воздуха и спиралевидного устройства для нагревания воды (см. рис. 1).

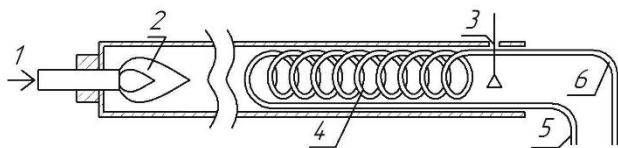


Рис. 1. Лабораторная водонагревательная установка:
1 – подача топливно-воздушной смеси; 2 – фронт пламени;
3 – газоанализатор; 4 – теплообменник; 5 – вход
теплоносителя; 6 – выход теплоносителя.

Использовался природный газ ($\text{CH}_4=94\%$) и пропан-бутановое топливо ($\text{C}_3\text{H}_8=75\%$, $\text{C}_4\text{H}_{10}=15\%$). В начале эксперимента сжигался природный газ при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1$. При постоянной температуре теплоносителя на входе теплообменника измерялась температура теплоносителя на выходе. Для имитации колебаний состава топлива к природному газу добавлялось пропан-бутановое топливо, концентрация которого изменялась от 0 до 30%. При этом общий расход топлива и расход воздуха оставались постоянными. При увеличении концентрации

пропан-бутана в смеси температура теплоносителя практически не изменялась, но при достижении 30% концентрации произошло значительное снижение этой температуры. Как известно [2] добавление к метану более «тяжелого» пропан-бутанового топлива приводит к увеличению общей удельной теплоты сгорания и увеличению минимального количества воздуха, необходимого для полного сгорания топлива. Так как расход воздуха остается постоянным появляется недожог топлива. Это сопровождается уменьшением скорости тепловыделения при горении, которое компенсируется повышением удельной теплоты сгорания. В результате при небольших концентрациях пропан-бутана количество теплоты, получаемое теплоносителем, и его выходная температура остаются практически постоянными. Однако, при концентрации пропан-бутана 30% недожог топлива становится настолько значительным ($\alpha=0,72$), что скорость тепловыделения и выходная температура теплоносителя начинают уменьшаться.

Таким образом, изменение концентрации пропан-бутана в смеси с природным газом до 30% при постоянном общем расходе топлива и воздуха не приводит к изменению выходной температуры теплоносителя. Однако, во всем диапазоне концентраций происходит неполное сгорание топлива, что приводит к его нерациональному использованию и ухудшению экологических показателей процесса горения.

Следовательно, дальнейшее исследование должно быть направлено на поиск условий, обеспечивающих постоянство выходной температуры теплоносителя и полное сгорание топлива при его минимальном расходе.

Список литературы:

1. Saifullin E.R., Nazarychev S.A., Malahov A.O., Larionov V.M., Iovleva O.V. The heat effect of combustion process depending on fuel composition fluctuations. Journal of Physics: Conference Series. – V. 789. – 2017. – № 012045.
2. Кнорре Г.Ф., Арефьев К.М., Блох А.Г. Теория топочных процессов; под ред. Г.Ф. Кнорре, И.И. Палеева. – М.; Л.: Энергия. – 1966. – 491 с.

ДВУМЕРНАЯ СТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Немировский Ю.В.¹, Мозгова А.С.²

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

² Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова
428015, Россия, Чебоксары, пр-т Московский, д. 15

Тепловая сеть – это совокупность трубопроводов и устройств, обеспечивающих посредством теплоносителя (горячей воды или пара) транспортировку теплоты от источника теплоснабжения к потребителям. Трубопроводы тепловых сетей представляют собой многослойные цилиндрические неоднородные конструкции. В системах централизованного теплоснабжения транспортировка тепла от теплоисточника до потребителей связана с потерями тепловой энергии, в том числе через тепловую изоляцию трубопроводов тепловых сетей [1]. Тепловая изоляция – это элемент конструкции, уменьшающий процесс теплопередачи и выполняющий роль основного термического сопротивления в конструкции [1]. Тепловая изоляция служит для уменьшения тепловых потерь и обеспечения допустимой температуры изолируемой поверхности. В качестве тепловой изоляции, в зависимости от температуры теплоносителя, используется минеральная вата или пенополиуретан.

По опыту проведения энергетических обследований величина тепловых потерь при транспортировке теплоносителя в существующих тепловых сетях составляет 15–30% в зависимости от времени года [2]. Тепловые потери являются одним из основных показателей энергетической эффективности эксплуатации тепловых сетей и включаются в тарифы на тепловую энергию. Определение фактических тепловых потерь является важной практической задачей. Под тепловыми потерями понимается количество теплоты, переданной от теплоносителя через конструкции тепловых сетей в окружающую среду.

Для определения уровня тепловых потерь на участке трубопровода в работе [3] было введено понятие – идеальная труба. Под идеальной трубой понимается такая труба, у которой отсутствуют шероховатости на внутренней поверхности, а стенки трубопровода непроницаемы для потока тепла. Соответственно в такой трубе потери будут отсутствовать.

Уровень тепловых потерь на участке трубопровода тепловых сетей можно определить, как разность между количеством теплоты при идеальных условиях и количеством теплоты с учетом тепловых потерь через слои трубопровода тепловых сетей. Для определения тепловых потерь согласно закону Фурье, необходимо определить температурное поле. Теплопроводность однородных цилиндрических конструкций широко рассмотрена в работах [4]– [6]. В решениях данных работ коэффициент теплопроводности также является постоянной величиной. Если рас-

сматривать неоднородные слои конструкции тепловых сетей, то коэффициент теплопроводности в общем случае зависит от координат. В рамках данной работы рассмотрим двумерную стационарную задачу теплопроводности участка трубопровода тепловых сетей конечных размеров с протекающим теплоносителем вдоль координаты z , учитывая, что каждый слой обладает своими физическими свойствами, а коэффициент теплопроводности зависит от направления координат r и z .

Уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах имеет вид [7]:

$$\frac{\partial \lambda_j}{\partial r} \frac{\partial T_j}{\partial r} + \lambda_j \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_j}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_j}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \lambda_j}{\partial z} \frac{\partial T_j}{\partial z} = \beta_j \omega_z \frac{\partial T_j}{\partial z},$$

$$\beta_j = 0 - \text{твердое тело} / 1 - \text{жидкость}$$

здесь ω_z – скорость теплоносителя вдоль координаты z , β_j – коэффициент, зависящий от агрегатного состояния вещества.

Список литературы:

1. Козин В.Е., Левина Т.А., Марков А.П., Пронина И.Б., Слемзин В.А. Теплоснабжение: Учебное пособие для студентов вузов. – Т34 М.: Высш. школа, 1980. – 408 с.,ил.
2. Мозгова А.С. Энергетическое обследование котельных и тепловых сетей/ А.С. Мозгова, А.В.Суриков // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы III Международной (IX Всероссийской) конференции НАСКР-2016. Изд-во Чуваш.ун-та, г.Чебоксары. 2016. – С.474–480.
3. Немировский Ю.В., Мозгова А.С. Проблемы теплопроводности тепловых сетей. Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции «актуальные вопросы архитектуры и строительства». Издательство: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 2018. С. 9–15.
4. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М: Высш.шк., 2001. –550 с.
5. Туголуков Е.Н. Решение задач теплопроводности методом конечных интегральных преобразований: Учебное пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та с. 2006. 116 с.
6. Мельников В.В. Нестационарный теплообмен в полном составном цилиндре // ПМТФ. 2005. – Т. 46, N 2. – С. 130–140.
7. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. -М: Энергия, 1967. – 409 стр.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке
РФФИ и Кабинета Министров Чувашской
Республики в рамках научного проекта
№ 17-41-220001*

КОМБИНИРОВАННЫЙ СЕПАРАТОР ДЛЯ ПОДОГРЕВА, ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА И УДАЛЕНИЯ ВЛАГИ НА ВСАСЕ УСТРОЙСТВА ВОЗДУХООЧИСТКИ

Петрушин А.А., Птахин А.В., Крылов В.С., Картусова А.Ю.

ЗАО «НПВП «Турбокон», 248010, Россия, Калуга, ул.Комсомольская роща,43

В энергетических установках, где капельная влага оказывает разрушительное воздействие на фильтрующие элементы, применение сепараторов существенно снижает эксплуатационные расходы и расходы на обслуживание агрегатов [1,2]. Модуль комбинированного сепаратора в составе комплексного воздухоочистительного устройства (КВОУ) на ТЭЦ-21 предназначен для улавливания взвешенных капель воды в потоке воздуха, а также его подогрева или охлаждения. Применение сепаратора-подогревателя существенно ограничит воздействие капельной влаги и снежных заносов на фильтрующие элементы. Основным требованием к разрабатываемой конструкции сепаратора являлось ограничение в сопротивлении – не более 200 Па.

За основу была взята конструкция инерционного сепаратора для очистки воздуха на входе судового газотурбинного двигателя [3]. Были разработаны три варианта конструкции сепараторов – два варианта состояли из лопаток с карманами для улавливания капель, а третий с рядом оребренных труб с частичной сепарацией мелких капель на ребрах и последовательно расположенными за ними сепараторами жалюзийного типа. По результатам выполненных численных расчетов для оценки сопротивления и проведенных испытаний по сепарации на макетах был выбран вариант с рядом оребренных труб и последовательно расположенными за ними сепараторами жалюзийного типа – пластинчатый сепаратор с оребренной трубой (см. рис. 1а).

Предприятием ЗАО НПВП «Турбокон» был создан натурный стенд комбинированного сепаратора для подогрева, охлаждения воздуха и удаления влаги на всасе КВОУ.

Схема натурального стенда (см. рис. 1б) состоит из модуля сепаратора 2, теплообменного модуля 1, системы отбора давлений перед теплообменным модулем, за сепаратором, за фильтром $\Delta P1$, $\Delta P2$, $\Delta P3$ для измерения перепадов давлений, дренажной системы, генератора капель, блока форсунок 5, генератора снега 7, системы измерения температуры воздуха на входе и выходе из стенда $t'_{в03}$, $t''_{в03}$ системы измерения скорости на выходе из стенда $w''_{в03}$.

Модуль сепаратора состоит из двадцати пластин S образной формы изготовленных из нержавеющей стали закрепленных в корпусе с шагом 29,5мм. В стенде предусмотрена установка фильтра для КВОУ ГТУ.

Воздух с нужным расходом просасывается вентилятором, измерение скорости потока воздуха на выходе из стенда производится четырьмя датчиками

потока. Нагрев теплоносителя осуществляется при помощи электродогревателя Гейзер-200.

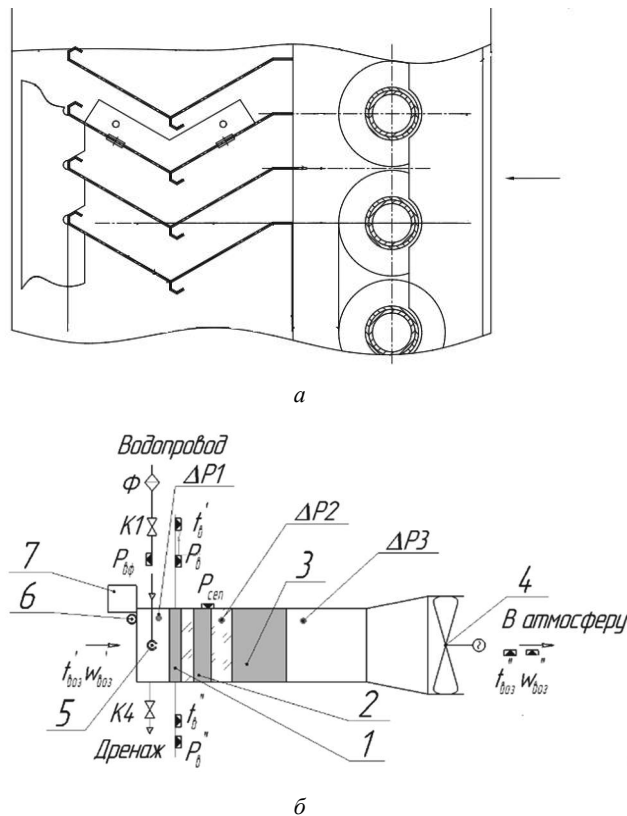


Рис. 1. Вид участка сепарации (а) и схема стенда (б)

В результате проведенных экспериментов были получены следующие данные: при скорости на входе $w=2,529$ м/с расход воздуха через стенд $G=1,211$ кг/с перепад давления на сепараторе $\Delta P=55$ Па; при скорости на входе $w=3,967$ м/с расход воздуха через стенд $G=1,906$ кг/с перепад давления на сепараторе $\Delta P=100$ Па.

Эффективность сепарации крупнодисперсной влаги пластинчатым сепаратором с оребренной трубой составляет 100%, мелкодисперсной влаги – 90%.

Список литературы:

1. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Результаты эксплуатации КВОУ блоков ПГУ ПАО «Мосэнерго» и планы по их модернизации // Новое в российской электроэнергетике. 2016. С. 33–43.
2. Жохов В.Л., Ленев С.Н. Паспорта загрязненности атмосферного воздуха на всасе КВОУ ГТУ ПАО «Мосэнерго» // Новое в российской электроэнергетике. 2017. № 12.С. 23–32.
3. Вышинский В. В., Наливайко А. Г. Расчётные исследования эффективности воздушных фильтров судовых газотурбинных двигателей // ТРУДЫ МФТИ. 2014. Т.6, № 1.С. 81–91.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТОЛЩИНЫ ВЕРХНЕГО КВАЗИОДНОРОДНОГО СЛОЯ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ратнер Ю.Б., Холод А.Л.

Морской гидрофизический институт РАН,
299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2

Толщина (глубина) верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) была получена на основе результатов модельных расчетов Черноморского центра морских прогнозов (ЧЦМП) ФГБУН МГИ [1], в период с 2012 по 2018 гг. Она была рассчитана по трехмерным полям температуры из архива данных бассейновых прогнозов ЧЦМП [1]. Для изучения пространственно-временной изменчивости глубины ВКС были использованы величины, рассчитанные в соответствии с алгоритмом, изложенным в работе [2], параметры которого были адаптированы к акватории Черного моря в соответствии с принципами, изложенными в работе [3].

На основе модельных расчетов был выполнен анализ пространственного распределения глубин ВКС, усредненных по времени за период с 2012 по 2018 гг, в каждом узле пространственной сетки модели по широте и долготе. Согласно данным расчетов средние глубины ВКС в районах шельфа принимают значения от 1 до 10 м оказываются меньшими, чем в глубоководном районе морской акватории, где она изменяется в пределах от 11 до 16 м. В глубоководном районе морской акватории наибольшие глубины ВКС наблюдаются в западной части Черного моря, наименьшие в юго-восточном районе.

Пространственное распределение стандартных отклонений величин ВКС от их значений, усредненных за семь лет, имеет такой же вид, как и для средней глубины. На шельфе глубины ВКС принимают значения от 1 до 9 м., в глубоководном районе стандартное отклонение изменяется преимущественно в интервале от 10 до 11 м. Выделяется несколько областей с повышенной изменчивостью глубин ВКС (стандартные отклонения – от 12 до 14 м.). Они локализованы в районах вблизи берега между Синопом и Трабзоном, между Анапой и Туапсе, между Судаком и Евпаторией. Первый и третий из этих районов имеют большую протяженность по ширине.

Дальнейшее изучение изменчивости глубин ВКС было выполнено с помощью разложения этих величин по эмпирическим ортогональным функциям на основе метода SVD [4]. В результате SVD разложения главные особенности пространственно-временной изменчивости оказываются сосредоточенными в первых слагаемых из попарных произведений пространственных и временных мод.

Первая пространственная мода в высокой степени подобна среднему полю глубин ВКС. В глубоководном районе толщина ВКС изменяется от 10 до 25 м. Первая временная мода имеет отчетливо выраженную сезонную изменчивость на которую наложен

высокочастотный шум. Первой модой объясняется примерно 50% дисперсии глубины ВКС.

Вторая пространственная мода разбивает морскую акваторию на две области: положительных значений глубины ВКС (0–20 м.) в юго-восточной и отрицательных (–20–0 м) в западной части моря, с границей раздела по линии от 32° в.д., 41.5° с.ш до 37° в.д, 45° с.ш. Вторая временная мода имеет более сложную изменчивость по сравнению с первой. В ней наблюдается несколько процессов: плавный сезонный ход, который выражен гораздо слабее по сравнению с первой модой, а также высокочастотные волновые пакеты в зимнее время года.

Третья пространственная мода также разбивает морскую акваторию на две большие области: положительных значений глубины ВКС (0–20 м.) в южной и отрицательных (–20–0 м.) в северной частях моря, с границей раздела по 43° с.ш. Изменчивость третьей временной моды качественно аналогична второй.

По мере дальнейшего роста порядка мод эмпирических ортогональных функций происходит уменьшение перепада глубин и фрагментация пространственных мод на все более мелкие области положительных и отрицательных значений. Во временных модах происходит ослабление плавной сезонной компоненты и усиление роли высокочастотных волновых пакетов в зимнее время года. Спектральный анализ временных мод, выполненный в рамках предположений об их стационарности, а также на основе метода EMD [5], позволил оценить частотные диапазоны, дающие наиболее существенный вклад в их изменчивость.

Список литературы:

1. Коротаяев Г.К., Ратнер Ю.Б., Иванчик М.В., Холод А.Л., Иванчик А.М. Оперативная система диагноза и прогноза гидрофизических характеристик Черного моря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 5. С. 609–617.
2. Кузнецов А.А., Мамонтова Т.В. Алгоритм автоматизированной обработки данных глубоководных измерений при определении глубины ВКС // Вопросы прикладной океанологии. 1988. № 144. С. 69–77.
3. Ratner Yu. B., Kholod A. L. Estimation of the numerical modeling accuracy of the Black Sea thermohaline fields based on using ARGO profiling floats // 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 1128 012150 doi:10.1088/1742-6596/1128/1/012150
4. Матричный анализ / Хорн Л., Джонсон Ч. -М.: Мир, 1989. 655 с.
5. Huang, N. E., Z. Shen, et. al The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proc. R. Soc. London, Ser. A, 454, 903–995.

Работа поддержана РНФ (грант № 17-77-30001)

ДВИЖЕНИЕ ОДИНОЧНОГО ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ ТЕЙЛОРА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Слесарева Е.Ю.¹, Дехтярь Р.А.^{1,2}, Овчинников В.В.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Классическая задача о всплывании большого газового пузыря (пузырь Тейлора), в трубке с жидкостью имеет важное практическое значение для многих отраслей промышленности, энергетики, нефтедобычи [1]. В рамках этой задачи важным является исследование влияния процессов тепло-массообмена между паровым пузырем и жидкостью на форму и скорость движения пузыря Тейлора в растворе абсорбента. В этом случае, необходимо учитывать тепловыделение при абсорбции и изменение концентрации абсорбента в окрестности пузыря.

На рис. 1 показана схема установки. Жидкость заливалась в калиброванную стеклянную трубку 1 длиной $L=400$ мм, внутренним диаметром $D=16$ мм. Верхняя часть трубки через вакуумную ловушку соединялась с вакуумным насосом 3. Давление над жидкостью измерялось вакуумметром 2. Для перегрева жидкости использовался цилиндрический электронагреватель 8, с гальванической развязкой от раствора. В центральной части нагревателя помещалась хромель-алюмелиевая термопара. Для обеспечения герметичности между нагревателем и рабочим объемом использовалась уплотнительная втулка 7 из вакуумной резины. Уровень тепловыделения на нагревателе задавался с помощью регулируемого источника постоянного тока 6 мощностью 1000 Вт.

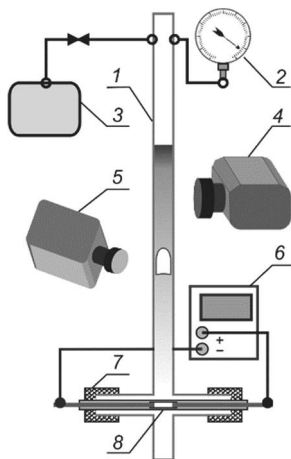


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Для определения объема, площади поверхности, положения, скорости движения U парового пузыря и уровня жидкости в трубке проводилась видеосъемка рабочего участка цифровой видеокамерой 4 со скоростью до 1000 к/с. Поле температуры жидкости по высоте трубки перед вскипанием определялось по термограммам тепловизора 5.

На рисунке 2 показана зависимость положения головки и дна пузыря Тейлора от времени для случая «зависания». Видно, что дно движется со скоростью

U близкой к скорости всплывания газового пузыря [2], в то время как головка через 0, 2 с резко тормозится на высоте 120 мм на время порядка 0, 3 с.

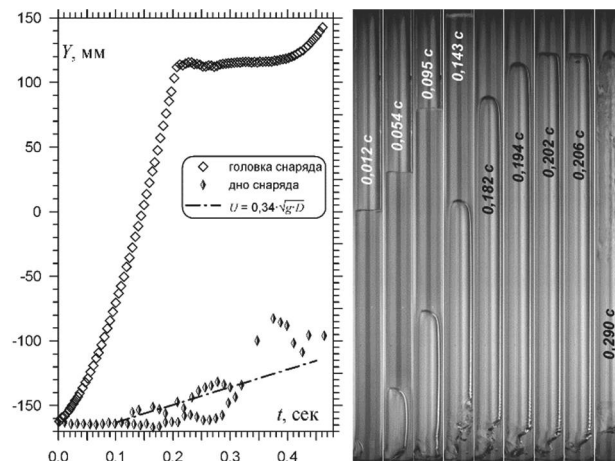


Рис. 2. Изменение положения парового пузыря во времени. 58% раствор LiBr в воде.

Исследование показало, что динамика паровой полости при вскипании раствора бромида лития в вертикальной трубке малого диаметра при определенных начальных параметрах имеет качественное отличие от динамики парового пузыря в условиях большого объема. Так же имеются качественные отличия в характере движения газового и парового пузыря. Это связано с тем, что масса газового пузыря и температура жидкости вблизи пузыря не меняется во время всплывания, тогда как масса парового пузыря и температура пара в пузыре и жидкости около пузыря может существенно меняться вследствие испарения жидкости и конденсации пара. Одним из таких отличий является то, что в трубке малого диаметра, можно наблюдать пульсационный режим изменения массы и объема паровой полости, связанный с изменением высоты уровня жидкости в трубке. Это является следствием того, что давление в пузыре зависит от высоты столба жидкости над пузырьком, но при этом высота уровня жидкости в трубке зависит от объема пузыря.

Список литературы:

1. Nickens H.V., Yannitell D.W. The effects of surface tension and viscosity on the rise velocity of a large gas bubble in a closed, vertical liquid-filled tube // International Journal of Multiphase Flow. 1987. Vol. 13. Iss. 1. P. 57–69.
2. White E.T., Beardmore R.H. The velocity of rise of single cylindrical air bubbles through liquids contained in vertical tubes // Chemical Engineering Science. 1962. Vol. 17. Iss. 5. P. 351–361.

*Исследования выполнены в рамках
государственного задания ИТ СО РАН*

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ МУСОРА НА КОНВЕЙЕРЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СОРТИРОВКИ

Серёдкин А.В.^{1,2}, Токарев М.П.¹, Плохих И.А.¹, Гобызов О.А.¹, Маркович Д.М.¹

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет, НГУ,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Твёрдые коммунальные отходы (в дальнейшем просто отходы) представляют собой один из видов отходов потребления. В их число входят остатки продуктов, отслужившие свой срок товары и изделия, использованные упаковки и т.д. На каждого городского жителя в среднем образуется 300 кг отходов в год [1]. Используемые на сегодняшний день технологии переработки имеют ограничения на состав перерабатываемых отходов, что делает их специализированными.

Захоронение (изоляция) отходов является технологически самым простым способом. При захоронении пригодных дальнейшему использованию отходов их ресурсный потенциал уничтожается. Более продуктивной является утилизация отходов путем сжигания с целью получения энергии. Сжиганию целесообразно подвергать в основном отходы, не пригодные для вторичной переработки (рециклинга) и не представляющие угрозы с точки зрения экологии. Компостирование – ещё один распространённый способ утилизации отходов, позволяющий изготавливать минеральные удобрения для почвы и посадочных культур. Этот способ основывается на биологическом разложении отходов, и присутствие неразлагаемых компонентов, таких как стекло, металл и большинство пластиков в составе исходного сырья ухудшает качество конечного продукта вплоть до его полной непригодности. Наконец, существенная часть отходов может быть переработана и повторно использована в производстве продукции. В первую очередь это касается металлов, стекла, пластика, бумаги и картона.

Таким образом, для снижения экологической нагрузки на окружающую среду и повышения эффективности распространённых способов утилизации отходов качественная предварительная сортировка является необходимым этапом. В связи с этим целесообразной становится разработка новых технологий сортировки.

Работа посвящена разработке и апробации способа детектирования и классификации отходов на конвейерной линии с использованием нейросетевой обработки изображений. Распакованные отходы предполагается подавать на конвейерную ленту в виде отдельных объектов, которые располагаются на ленте естественным образом. Плотность раскладки подбирается таким образом, что бы случаи перекрытия одного предмета другим были достаточно редки.

Предложенный способ предполагается использовать в составе системы оптической регистрации и автоматизированного манипулятора. Первым, при движении вдоль конвейерной ленты, располагается система построения карты высот. Система состоит из камеры и лазерного ножа, развёрнутого поперёк ленты. Камера регистрирует форму лазерного ножа на

поверхности предмета, что позволяет восстановить профиль высоты в сечении ножа. По профилям, измеренным в различные моменты времени, составляется карта высот. Следующей располагается система классификации отходов. Регистрирующая камера располагается над конвейерной лентой и направлена вертикально вниз. Изображения с этой камеры подаются на вход нейронной сети, которая определяет положение и тип объектов на снимке [2].

Для обучения нейронной сети была создана база из более 13 000 изображений бытовых отходов трёх типов: ПЭТ-бутылка, ёмкость из полиэтилена высокой плотности (HDPE) и алюминиевая банка. Точность классификации по этим трем классам превышает 70%, на изображениях из нескольких объектов (см. рис. 1). Точность определения положения составляет не хуже 70% по метрике mAP, представляющей собой комбинированную оценку точности определения положения и классификации.

Информация о типах, позиции и размерах предметов передаётся системе сбора, расположенной после системы классификации. Система решает, какие предметы выгоднее всего забрать с конвейерной ленты за время их движения в зоне захвата манипулятора, и отдаёт ему соответствующие команды. Манипулятор захватывает предмет с ленты и кладёт его в нужную корзину.

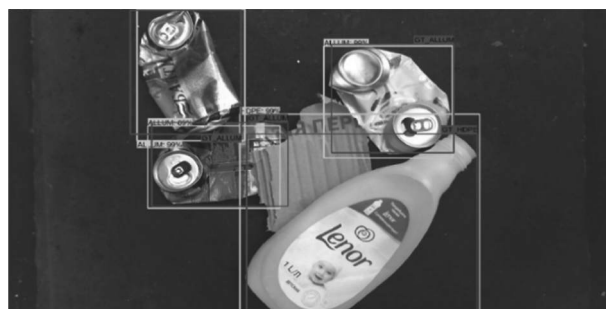


Рисунок 1. Пример изображения детектирования объектов.

Список литературы:

1. Шубов Л.Я., Доронкина И.Г., Борисова О.Н. Проблема твердых бытовых отходов – глобальная проблема XXI века. // Сервис в России и за рубежом. – 2011. – №1(20). [Электронный ресурс]: URL: http://electronic-journal.rguts.ru/index.php?do=cat&category=2011_1 (дата обращения: 11.4.2019).
2. Tensorflow detection model zoo [электронный ресурс] URL: https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/g3doc/detection_model_zoo.md (дата обращения: 11.4.2019).

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки
России (идентификатор проекта
RFMEFI60418X0203)*

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ТЕЛА НА РАБОТУ ГАЗОТУРБИННОГО ЦИКЛА

Филиппов П.С., Толмачев Е.М., Ефимовых И.С., Рыжков А.Ф.

Уральский федеральный университет, 620002,
Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Работа посвящена анализу влияния изменения теплофизических параметров рабочего тела газовой турбины, полученного при сжигании искусственных газовых топлив, на экономические и энергетические показатели ГТУ и ПГУ в целом.

Стандартным способом повышения экономических и энергетических показателей ГТУ, работающей в составе ПГУ на готовом традиционном газовом топливе (природный газ), является увеличение начального давления P_3 и температуры T_3 рабочего тела газовой турбины [1]. Для ГТУ, работающей в составе ПГУ-ВЦГ, повышение энергетических показателей может быть достигнуто, как и для ГТУ с замкнутым циклом (ЗГТУ), не только за счет изменения термодинамических параметров (P_3 и T_3), но и за счет коррекции состава рабочего тела газовой турбины [2]. Коррекция состава рабочего тела сопровождается изменением его теплофизических параметров – молярной массы μ и удельной массовой теплоемкости c_{pm} .

В работе приводится термодинамический анализ идеального цикла Брайтона для рабочих тел разного состава в выбранной области управляющих параметров (см. табл. 1). Приведено сравнение действительности термодинамических (P_3 и T_3) и теплофизических (μ и c_{pm}) параметров рабочего тела газовой турбины на экономический (внутренний КПД η_i) и энергетический (полезная работа l_0) показатели газотурбинного цикла. Выявлены возможности повышения экономического и энергетического показателей ГТУ за счет коррекции теплофизических параметров рабочего тела.

Табл. 1. Диапазон вариации управляющих параметров.

Параметр	Единицы измерения	Значение параметра	
		min	max
P_3	МПа	1,4	1,8
T_3	°C	1200	1400
$(H_2O)_{PT}$	об. %	0	100
$(CO_2)_{PT}$	об. %	0	100
k	-	1,170	1,666
μ	кг/кмоль	4	132
c_{pm}	кДж/(кг·К)	0,158	5,204

Выбор термодинамических параметров (P_3 и T_3) рабочего тела перед газовой турбиной обусловлен принятыми в настоящее время к использованию и разработке классами ГТУ, модифицируемыми для работы на искусственных газовых топливах.

Диапазон изменения показателей адиабаты (k), молярных масс (μ) и удельных массовых (c_{pm}) и молярных (c_{pm}) теплоемкостей соответствуют параметрам рабочих тел, применяемых в практике открытых (ГТУ) и закрытых (ЗГТУ) газотурбинных циклов и состоящих из чистых сред, а также их комбинаций (см. табл. 2).

Табл. 2. Характеристики рабочих тел (в принятом диапазоне температур $t_3=1200\div1400$ °C и давлений $P_3=1,4\div1,8$ Мпа).

Среда	μ , кг/кмоль	k	c_{pm} , кДж/кг·К	c_{pm} , кДж/кмоль·К	Применение
Гелий (He)	4	1,666	5,204	20,816	ЗГТУ
Водяной пар (H ₂ O)	18	1,228÷ 1,237	2,407÷ 2,526	43,321÷ 45,472	ЗГТУ, ГТУ
Стандартное рабочее тело (сжигание природного газа в воздухе)	27,72÷ 27,93	1,296÷ 1,309	1,198÷ 1,244	33,447÷ 34,495	ГТУ
Азот (N ₂)	28	1,315÷ 1,326	1,165÷ 1,196	32,621÷ 33,500	ЗГТУ, ГТУ
Воздух	28,75	1,312÷ 1,322	1,150÷ 1,179	33,051÷ 33,892	ЗГТУ
Кислород (O ₂)	32	1,303÷ 1,311	1,099÷ 1,121	35,155÷ 35,871	ЗГТУ
Углекислый газ (CO ₂)	44	1,165÷ 1,170	1,282÷ 1,310	56,397÷ 57,656	ЗГТУ, ГТУ
Ксенон (Xe)	131	1,666	0,158	20,750	ЗГТУ

В результате получены зависимости экономического (η_i) и энергетического (l_0) показателей от теплофизических параметров рабочего тела газовой турбины (см. рис. 1).

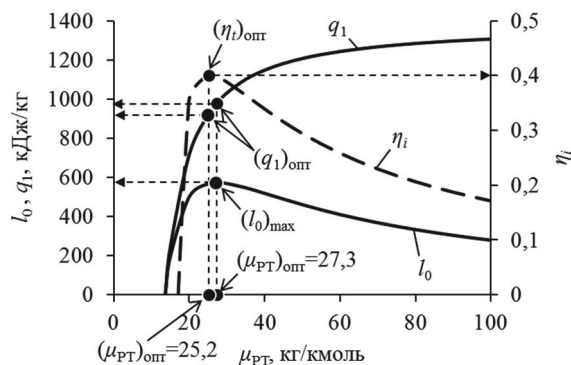


Рис. 1. Зависимость экономического и энергетического показателей цикла от молярной массы рабочего тела при $c_{pm}=1$ кДж/(кг·К), $T_3=1400$ °C, $P_3=1,8$ МПа.

Определены оптимальные теплофизические параметры рабочего тела (μ)_{опт} и (c_{pm})_{опт} при которых газотурбинный цикл работает в максимально-экономичном и энергетически эффективном режиме на искусственных газовых топливах.

Список литературы:

1. Термодинамика / М.П. Вукалович, И.И. Новиков. М.: Машиностроение, 1972. 672 с.
2. Анализ технологических решений для ПГУ с внутрцикловой газификацией / Н.А. Абаймов, И.Б. Амарская, В.С. Белоусов и др.; Под ред. А.Ф. Рыжкова. Екатеринбург: УрФУ, 2016. 607 с.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ, ПОЛУЧЕННЫХ В ФГБУН МГИ И СЛУЖБЕ COPERNICUS

Холод А.Л., Ратнер Ю.Б., Иванчик М.В.

Морской гидрофизический институт РАН,
299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2

Температура морской поверхности (ТПМ) является одним из основных параметров, характеризующих состояние Мирового океана. Ее знание обеспечивает решение задач прогнозирования погоды, состояния океана, изменения климата и т.п. Поэтому необходим непрерывный мониторинг и прогноз ее состояния. В настоящее время для этих целей применяются системы прогноза состояния морской среды с использованием численных гидродинамических моделей.

С 2012 года в Морском гидрофизическом институте (МГИ) функционирует оперативная автоматическая система диагноза и прогноза состояния Черного моря [1]. В основе работы системы лежит трехмерная гидродинамическая модель Демьшева-Коротаева [2]. Ежедневно выполняются расчеты полей температуры, солёности, скоростей течений и уровня моря. Данные численных расчетов доступны с пространственным разрешением по горизонтали – 5 километров, по вертикали имеется 38 нерегулярных уровней от поверхности до дна Черного моря, временное разрешение составляет 3 часа.

Аналогичная система создана и функционирует в евросредиземноморском центре по изменению климата (Лечче, Италия) и является составной частью Европейской морской службы Copernicus [3]. В основе лежит модель NEMO, версия 3.4. Разрешение горизонтальной сетки модели составляет $1/36^\circ \times 1/27^\circ$ (около 3 км) и имеет 31 нерегулярных вертикальных уровней. Результаты расчетов корректируются с помощью вариационной ассимиляции (3DVAR) спутниковых аномалий уровня моря, температуры поверхности моря и in-situ измерений профилей температуры и солёности.

Для оценки точности прогнозирования данных ТПМ было выполнено сопоставление результатов численных расчетов с контактными измерениями, проводимыми непосредственно в море с помощью STD-зондов, которые принимаются за эталонные. С этой целью была сформирована их совместная выборка. При ее формировании были использованы методы линейной интерполяции для устранения пространственно-временной рассогласованности данных модельных расчетов и in situ измерений. Модельные данные по времени и по пространству интерполировались на моменты и точки локализации in situ измерений. Далее вертикальный профиль in situ измерений интерполировался на первый горизонт модельных расчетов – 2.5 метра.

Точность прогнозирования температуры поверхности Черного моря оценена на основе сопоставления с данными in situ измерений с сентября 2017 по октябрь 2018 гг. За этот период времени были доступны 434 профиля температуры, полученных с помощью STD-зондов с борта НИС «Профессор Водяницкий».

Сопоставление выполнялось для различных сроков прогнозов – сутки, двое, трое, четверо, пятеро. Соответственно было получено пять наборов статистических оценок среднего (μ) и среднеквадратичного (σ) отклонений для каждого центра прогнозирования. Архив данных модельных расчетов температуры в службе Copernicus является скользящим и обновляется ежедневно. Данные каждого цикла прогнозов доступны пользователям одни сутки. Поэтому для формирования архива осуществлялась ежедневная загрузка текущего цикла прогноза в интерактивном режиме. По техническим причинам в некоторые дни мы не имели возможности принимать эту информацию. Поэтому созданный архив имеет пропуски в данных, общее число совместных измерений (N) для различных сроков прогнозов приведены в таблице 1. Кроме того, из общей совместной выборки были исключены измерения, где модель не смогла воспроизвести апвеллинги у берега Крыма. Результаты сопоставлений представлены в таблице 1.

Таблица 1. Точности прогнозирования ТПМ.

Срок прогноза	МГИ			Служба Copernicus		
	N	μ , °C	σ , °C	N	μ , °C	σ , °C
0	412	-0.11	0.41	321	-0.18	0.55
1	412	-0.15	0.46	331	-0.18	0.58
2	412	-0.13	0.49	334	-0.25	0.57
4	412	-0.14	0.58	343	-0.23	0.63
5	363	-0.12	0.64	350	-0.22	0.73

Анализ таблицы 1 показывает, что в обоих центрах имеет место отрицательное смещение ТПМ, полученной по модели, по отношению к данным in situ измерений. Точность прогнозирования ТПМ в МГИ лучше, чем в службе Copernicus: среднеквадратичное отклонение в среднем меньше на 15%. В обоих центрах точность прогнозирования падает с увеличением срока прогноза.

Список литературы:

1. Коротаев Г.К., Ратнер Ю.Б., Иванчик М.В., Холод А.Л., Иванчик А.М. Оперативная система диагноза и прогноза гидрофизических характеристик Черного моря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. №. 5. С. 609–617.
2. Демьшев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке C. // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М: ИВМ РАН. 1992. С. 163–231.
3. Ciliberti S. A. et al. Implementation of Black Sea numerical model based on NEMO and 3DVAR data assimilation scheme for operational forecasting //EGU General Assembly Conference Abstracts. – 2016. – Т. 18.

Работа поддержана РНФ (грант № 17-77-30001)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ЦИКЛОННОМ ПРЕДТОПКЕ

Штым К.А., Соловьёва Т.А., Кулик А.В.

ДВФУ, 690091, Россия, Приморский край, г. Владивосток, ул. Суханова, 8

Циклонно-вихревой организацией топочного процесса детально занимаются сотрудники кафедры «Теплоэнергетики и теплотехники» ДВФУ начиная с середины 70-х годов прошлого века [1]. На Дальнем Востоке более 60 единиц котельных агрегатов модернизированы на циклонно-вихревую технологию сжигания мазута и газа.

Для равномерного распределения тепловых потоков в топочном объёме, поддержания параметров теплоносителя (температуры котловой воды, температуры перегрева пара), с учётом свободного пространства вокруг котла, котельные установки комплектуют ЦВП встречно, одноярусно, двухярусно и с уклоном. Опыт эксплуатации модернизированных котлов показал, что встречная компоновка ЦВП наиболее эффективна с точки зрения теплообмена в топке котла [1].

Для исследования распределения температурных полей подготовлен водогрейный котёл КВГМ 116,3–150 МЦ Владивостокской ТЭЦ-1, оснащенный двумя газомазутными ЦВП встречной компоновки мощностью 65 МВт каждый.

Детальные исследования температурных полей закрученного потока при горении газа в объёме предтопка [2] продолжены исследованиями распределения температурных полей в футеровке ЦВП, для чего в футеровку вмонтированы термопары. Схема расположения термопар в футеровке ЦВП показана на рисунке 1.

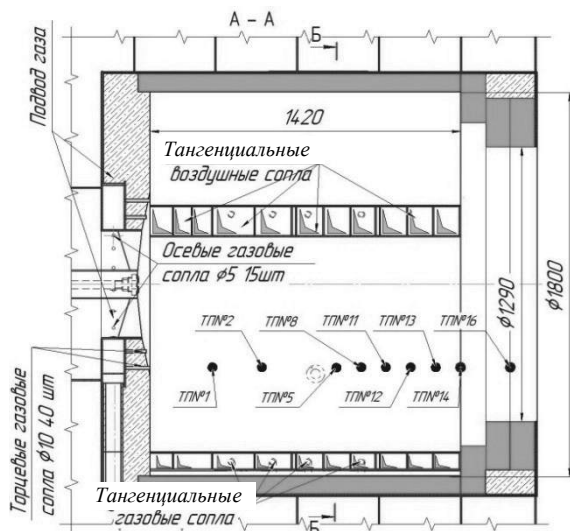


Рис. 1. Схема расположения термопар.

Исследования проводились в камере сгорания одного из двух ЦВП при двух режимах. Режим 1 – два предтопка в работе на нагрузке 13 МВт каждый, подвод газ в ЦВП осуществлялся через торцевые и осевые сопла, тепловая нагрузка котла составляет 26 МВт.

Для определения влияния совместной работы предтопков при встречной компоновке на одном ЦВП была увеличена нагрузка на 16 МВт – режим 2.

Увеличение нагрузки осуществлено за счет подвода газа в ЦВП через тангенциальные сопловые газовые вводы.

На рисунке 2 изображён график распределения температур по длине камеры сгорания ЦВП.

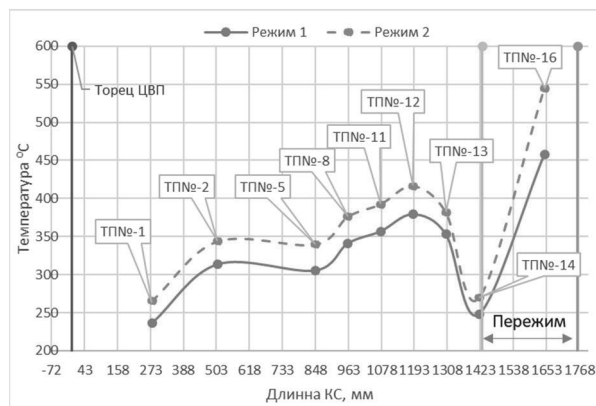


Рис. 2. Изменение температуры в футеровке.

По результатам исследований отмечается повышение температуры в футеровке по всей длине ЦВП, что согласуется с изменением температуры ядра факела в предтопке [3]. Максимальный рост температуры на 86 °С зафиксирован термопарой ТП №16, минимальный рост температуры на 21,5 °С зафиксировала ТП №14.

Многоступенчатость подвода воздуха в ЦВП позволяет влиять на эмиссию оксидов азота, при этом охлаждается футеровка при растопочном режиме работы ЦВП (режим 1) в области установки ТП №5. Минимальный рост температур отмечен ТП №1 и ТП №14, что объясняется наличием при-торцевых перетоков, а так же расположением ТП №14 в «тени» от излучения из топки котла.

Результаты исследований теплообмена в ЦВП, совершенствование огнеупорного материала позволят уменьшить толщину обмуровки, сократить время растопки ЦВП, усовершенствовать конструкцию ЦВП.

Список литературы:

1. Штым А. Н., Штым К. А., Дорогов Е. Ю. Котельные установки с циклонными предтопками // Владивосток: Изд. дом Дальневосточ. федер. ун-та, 2012. – 421 с.
2. Соловьёва Т. А. Совершенствование процесса сжигания природного газа в котельных установках с циклонными предтопками: дис. канд. техн. наук: Красноярск, 2017. – 149 с.
3. Штым К.А., Соловьёва Т. А., Лесных А. В., Гончаренко Ю. Б. Особенности формирования приосевой области в циклонно-вихревом предтопке с комбинированной генерацией закрученного потока // III Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых. Ялта, Россия. 2018.

Содержание

Пленарные лекции

Губайдуллин А.А., Мусакаев Н.Г., Болдырева О.Ю. Моделирование физических процессов в пористых системах с газовыми гидратами	5
Дмитриев А.С. Функциональные энергетические наноматериалы на базе графена для солнечной энергетики и термостабилизации электроники	6
Зубарев Н.М., Зубарева О.В., Месяц Г.А., Садыкова А.Г., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И. Теоретические и экспериментальные исследования условий генерации убегающих электронов в сильно неоднородном электрическом поле	7
Исаев С.А. Теплогидродинамическое проектирование энергоэффективных поверхностей с наклонными овально-траншейными вихрегенераторами	8
Коротаев Г.К. Формирование вертикальной стратификации полей солёности и плотности Чёрного моря	9
Кузнецов В.В. Многомасштабная структура течений и межфазный теплообмен при фазовых и химических превращениях в микроструктурных системах	10
Павленко А.Н. Перспективы и проблемные вопросы в разработке методов интенсификации теплообмена при кипении и испарении	11

Секция 1. Теплообмен и гидродинамика в однофазных средах

Беляев И.А., Генин Л.Г., Пятницкая Н.Ю., Разуванов Н.Г., Свиридов В.Г. Методика исследования гидродинамики и теплообмена при течении жидких металлов в каналах различной формы	15
Бондарева Н.С., Шеремет М.А. Охлаждение элементов переменной мощности с использованием замкнутого радиатора, заполненного парафином с наночастицами	16
Виноградов Д.А., Тепляков И.О., Ивочкин Ю.П. Численное моделирование электровихревого течения в безындукционном приближении при наличии внешнего магнитного поля	17
Гатаулин Я.А., Юхнев А.Д., Смирнов С.И., Росуховский Д.А. Численное исследование влияния упругости створок на течение в венозном клапане	18
Герасимов А.В., Кирпичников А.П., Сабирова Ф.Р. О явлении бициклона в высокочастотном индукционном разряде атмосферного давления	19
Гибанов Н.С., Шеремет М.А. Сложный теплообмен в замкнутой квадратной полости с локальным источником периодического тепловыделения	20
Глотов В.Ю., Головизнин В.М., Канаев А.А., Кондаков В.Г., Киселев А.Е. Моделирование процессов перемешивания и стратификации газовых смесей в задачах анализа водородной безопасности по схеме Кабаре	21
Давлетшин И.А., Саушин И.И., Гольцман А.Е. Теплоотдача и структура турбулизированного потока в конфузоре	22
Есенбаев Т.Е., Флягин В.М., Иванова Н.А. Осциллирующая неустойчивость термокапиллярной деформации в тонком слое Н-бутанола, вызванная лазерным нагревом	23
Колодежнов В.Н. Локальные критерии ламинарно-турбулентного перехода	24
Колодежнов В.Н. моделирование течения вязкопластической Жидкости с эффектом «отвердевания»	25
Кондаурова Л.П., Ефимов В.Б. Влияние квантовой турбулентности на распространение мощных тепловых импульсов и процессы вскипания в сверхтекучем гелии	26
Котляр А.В., Листратов Я.И., Свиридов В.Г., Беляев И.А. Гидродинамика и теплообмен расплавов солей в реакторе ТОКАМАКа	27
Леманов В.В., Лукашов В.В., Шаров К.А. Влияние перемежаемости на переход к турбулентности в струях	28
Макаров М.С., Макарова С.Н. Численное моделирование энергоразделения газовой смеси с малым числом Прандтля в оребренной одиночной трубе Леонтьева	29
Матвиенко О.В., Мартынов П.С. Теплообмен равновесно диссоциирующего газа в цилиндрическом канале	30
Миронов С.Г., Анискин В.М., Маслов А.А. Влияние условий течения недорасширенных струй на длину сверхзвукового участка	31
Михеев Н.И., Саушин И.И., Душин Н.С., Шакиров Р.Р. Процессы переноса в динамически неравновесных турбулентных течениях	32
Молочников В.М., Михеев Н.И., Михеев А.Н., Саушин И.И. Анизотропия турбулентных пульсаций скорости и моменты третьего порядка в ближнем следе поперечного кругового цилиндра	33
Наумкин В.С., Низовцев М.И. Численное моделирование процессов тепло- и влагообмена в прямоточных мембранных теплообменниках	34
Палкин Е.В., Мулладжанов Р.И. Исследование характеристик обтекания цилиндра в узком канале методом крупных вихрей	35

Платонов Д.В., Дектерев Ал.А., Дектерев Д.А., Минаков А.В., Дектерев Ар.А., Сентябов А.В., Лобасов А.С. Расчётно-экспериментальное исследование высокоэффективных роторов для малой гидроэнергетики	36
Полудницин А.Н., Шарифулин А.Н. Динамика гистерезисных переходов конвективного течения в наклонном квадрате	37
Разуванов Н.Г., Лучинкин Н.А., Сардов П.А. Исследование теплообмена при подъёмном течении жидкого металла в МГД-каналах применительно к модулю blankets реактора ТОКАМАКа	38
Рыжеников В.О., Мулладжанов Р.И. Численное моделирование ближней области закрученной кольцевой струи	39
Саушин И.И., Михеев Н.И., Гольцман А.Е. Реализация автомодельного пограничного слоя с положительным продольным градиентом давления	40
Ступникова А.В., Шарифулин А.Н. Гистерезисные переходы режимов стационарной тепловой конвекции в квадратной полости с движущейся стенкой	41
Суслов Д.А., Литвинов И.В., Шторк С.И. Переходные режимы в модели отсасывающей трубы гидротурбины	42
Терехов В.И., Дьяченко А.Ю., Смольский Я.И. Влияние дефлектора на тепломассоперенос за обратным уступом	43
Филиппов М.В., Чохар И.А., Терехов В.В., Терехов В.И. Экспериментальное исследование взаимодействия двух параллельных круглых струй	44
Филиппов М.В., Чохар И.А., Терехов В.В. Моделирование двух параллельных круглых струй методом крупных вихрей	45
Французов М.С., Александров В.Ю. Особенности радиационно-конвективного теплообмена в каналах сложной формы при сверхзвуковом течении реагирующей смеси	46
Цырюльников И.С., Анискин В.М., Миронов С.Г. Развитие возмущений в осесимметричных сверхзвуковых затопленных микроструях неравновесного элегаза	47
Черныш Д.Ю., Бирюков Д.А., Беляев И.А. Экспериментальное исследование смешанной конвекции жидкого металла в наклонной трубе	48
Шмелев Е.И., Свешников Д.Н., Куликов Д.А., Логинов А.В. Использование численных методов для анализа гидродинамических сил, действующих на конструкции в потоке теплоносителя	49
Секция 2. Гидродинамика и тепломассообмен в многофазных системах	
Алексеев Р.А., Грибин В.Г., Тищенко А.А., Гаврилов И.Ю., Тищенко В.А., Попов В.В. Исследование влияния внутриканальной сепарации на структуру потока капель за сопловой решеткой паровой турбины	53
Акершев С.П., Чиннов Е.А., Шатский Е.Н. Устойчивость и термокапиллярные структуры в стекающей пленке жидкости в условиях постоянного теплового потока на стенке	54
Аль-Музейкер М., Флягин В.М., Иванова Н.А. Манипуляция ансамблями микрочастиц в испаряющихся жидкостях: влияние локальных источников и стоков тепла	55
Антонникова А.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С. Экспериментальное исследование динамики разрушения макрообъёма жидкости	56
Ашихмин А.Е., Пискунов М.В., Хомутов Н.А., Яновский В.А. Взаимодействие капли топливной микроэмульсии с разогретой стенкой	57
Борзенко Е.И., Хегай Е.И., Шрагер Г.Р. Исследование слива вязкой жидкости под действием перепада давления с одновременным заполнением прямоугольной ёмкости	58
Булатова А.З., Абрамова О.А., Питюк Ю.А., Фаткуллина Н.Б. Численное моделирование динамики дисперсных частиц в вязкой жидкости методом граничных элементов	59
Булгакова Г.Т., Шарифулин А.Р. Математическое моделирование тепломассопереноса в вертикальной трещине гидроразрыва пласта	60
Бусов К.А., Решетников А.В., Мажейко Н.А., Капитунов О.А. Влияние активного и пассивного завихрителей на вскипание струй перегретой воды	61
Вдовин М.И., Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А. Влияние поверхностного волнения на обмен импульсом и теплом в пограничном атмосферном слое при сильных ветрах	62
Виноградов Д.А., Ивочкин Ю.П., Кубриков К.Г., Тепляков И.О. Исследование особенностей поведения перегретых жидкометаллических капель в газовой среде, воде и электромагнитном поле индуктора	63
Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Губин В.Е. Экспериментальные исследования структуры потока пневмомеханически распыленного водоугольного топлива	64
Глезер В.В., Мелешкин А.В., Барташевич М.В. Исследование влияния скорости декомпрессии на синтез газового гидрата методом взрывного вскипания сжиженного гидратообразующего газа	65
Гольцман А.Е., Саушин И.И. Численное моделирование турбулентного пограничного слоя газа на межфазной границе со стоячей жидкостью	66
Гурьянов А.И., Евдокимов О.А., Веретенников С.В., Гурьянов М.М., Калинина К.Л. Изучение процессов имитации дождя для сертификации авиационного двигателя	67

Диева Н.Н., Кравченко М.Н., Мурадов А.В., Лишук А.Н., Евтюхин А.В. Анализ применения теплофизических методов интенсификации притока на месторождениях трудноизвлекаемых углеводородов	68
Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А., Низовский В.Л., Низовский Л.В., Щигель С.С. Некоторые особенности течения перегретой метастабильной воды в конфузorno-диффузорных соплах и их влияние на дисперсионный состав факела распыла	69
Замула Ю.С., Юлмухаметова Р.Р., Гимадеев А.В., Мусин А.А., Ковалева Л.А. Моделирование течения вязкой несжимаемой жидкости с диспергированными частицами в канале прямоугольного сечения	70
Зиннатуллин Р.Р., Султангужин Р.Ф., Габдрафиков А.Ф., Гайнетдинов Э.Ф., Ковалева Л.А. Исследование влияния ВЧ и СВЧ электромагнитных полей на разрушение водонефтяных эмульсий	71
Кашкарова М.В., Наумов И.В. Моделирование различных структур ограниченных закрученных течений	72
Клюев Д.С., Флягин В.М., Иванова Н.А. Влияние теплового поля на движение границы термокапиллярного разрыва в двухслойных системах	73
Королева А.П., Французов М.С., Александров В.Ю. Расчетно-экспериментальное исследование теплообмена и гидродинамики в пористой среде подогревателя прерывного действия	74
Лаптев А.Г., Фарахов Т.М., Афанасьев Е.П. Теплогидравлические характеристики теплообменников с объемными интенсификаторами	75
Максимов В.М. Обобщенный закон многофазной фильтрации и новые эффекты поверхностных явлений при двухфазных течениях в пористой среде	76
Мелешкин А.В., Барташевич М.В., Глезер В.В. Исследование режимных параметров синтеза газового гидрата фреона 134а в циклическом процессе кипения-конденсации	77
Назаренко Н.Н., Князева А.Г. Конвективный и диффузионный режимы течения биологической жидкости через пористую стенку	78
Немировский С.К. Термодинамически равновесный вихревой клубок в противотекущем сверхтекучем гелии	79
Пономаренко Т.Г., Чеверда В.В. Изучение динамики теплообмена в капле жидкости при её падении на нагреваемую поверхность	80
Поплавский С.В., Минаков А.В., Шебелева А.А. Ранняя стадия взаимодействия капли с ударной волной: обтекание, деформация, разрушение	81
Сажин И.А., Шумейко В.А. Модель мобильной экспериментальной установки для определения параметров снарядного двухфазного потока	82
Сахипгареев А.Р., Морозов А.В., Рагулин С.В. Расчетное моделирование процессов капельного уноса борной кислоты при аварийном охлаждении реактора ВВЭР	83
Скиба С.С., Манаков А.Ю. Изучение самоконсервации газовых гидратов в суспензиях в нефтях	84
Султангужин Р.Ф., Зиннатуллин Р.Р., Ковалева Л.А. Исследования процессов взаимодействия электромагнитных полей с нефтенасыщенными дисперсными системами	85
Тимошевский М.В., Ничик М.Ю., Первунин К.С. Кавитационное обтекание тандема двумерных гидрокрыльев: высокоскоростная визуализация и PIV измерения	86
Тищенко А.А., Алексеев Р.А., Тищенко В.А., Гаврилов И.Ю., Попов В.В., Грибин В.Г. Разработка геометрии профиля сопловой лопатки с повышенной сепарационной способностью для влажно-паровых ступеней паровых турбин	87
Фаткуллина Н.Б., Абрамова О.А., Питюк Ю.А., Булатова А.З. Трехмерное моделирование динамики и расчет реологических характеристик эмульсий методом граничных элементов	88
Филимонов М.Ю., Ваганова Н.А. Моделирование эксплуатации геотермальной циклической системы с учетом сезонного потребления горячей воды	89
Хасанов М.К., Столповский М.В., Кильдибаева С.Р., Мусакаев Н.Г. Разложение газогидрата метана при инъекции жидкого диоксида углерода в газогидратный пласт	90
Черданцев М.В., Исаенков С.В., Черданцев А.В. Интегральные характеристики дисперсно-кольцевого течения	91
Чиннов Е.А. Формирование термокапиллярных структур, разрыв и интенсификация теплообмена в стекающих пленках жидкости	92
Шарифуллин Б.Р., Наумов И.В. Перенос углового момента в расслоенных двухфазных течениях при организации вихревого движения жидкости	93
Элоян К.С., Роньшин Ф.В., Чеверда В.В. Исследование влияния микрооребрений на теплообмен в двухфазной системе	94
Элоян К.С., Крета А.С. Влияние контролируемых пульсаций на теплообмен в двухфазной системе в миниканале прямоугольного сечения	95
Секция 3. Фазовые переходы	
Авдеев А.А., Кубриков К.Г. Вскипание жидкости при разрыве трубопровода высокого давления	99
Байдаков В.Г. Жидкость под отрицательным давлением: предельные растяжения, кавитация	100

Белослудов В.Р., Жданов Р.К., Божко Ю.Ю., Субботин О.С. Теоретическое исследование областей стабильности смешанных гидратов H_2+CO_2 структур КС-I и КС-II	101
Божко Ю.Ю., Гец К.В., Субботин О.С., Белослудов В.Р. Моделирование структуры и термодинамических свойств двойных гидратов озона и аргона, озона и диоксида углерода методами молекулярной и решеточной динамики	102
Бородулин В.Ю., Летушко В.Н., Низовцев М.И., Стерлягов А.Н. Влияние структуры поверхности на процесс испарения лежащих каплей воды.....	103
Гец К.В., Субботин О.С., Белослудов В.Р., Божко Ю.Ю., Жданов Р.К. Термодинамические свойства гидрата тетрабутил аммония бромида	104
Жданов Р.К., Гец К.В., Божко Ю.Ю., Субботин О.С. Теоретическое исследование свойств гидратов азота вне зоны термодинамической стабильности	105
Зубарева А.Н., Лавров В.В., Уткин А.В. Ударно-волновые и детонационные свойства химически активных пористых сред.....	106
Козулин И.А., Кузнецов В.В. Динамика взрывного кипения двухкомпонентных жидких смесей	107
Лебеда К.С., Макаров М.С., Макарова С.Н. Влияние радиационного теплообмена на сублимацию одиночной частицы beta-дикетоната хрома (III) в перегретой смеси пара и инертного газа	108
Левин А.А. Нестационарная модель пристенного кипения потока недогретой жидкости.....	109
Маликов А.Г., Оришч А.М., Булина Н.В. Влияние термообработки на фазовые переходы высокопрочных лазерных сварных соединений алюминий-литиевого сплава	110
Манакон А.Ю., Стопорев А.С., Сагидуллин А.К. Нуклеация гидрата метана в эмульсиях воды в нефтях: роль температуры, материала стенок сосуда и свойств нефти.....	111
Пузина Ю.Ю., Крюков А.П., Ячевский И.А. Определение толщины паровой пленки при стационарном пленочном кипении сверхтекучего гелия	112
Рожков А.Н. Разложение гидратов метана в водной среде и в среде газообразного метана.....	113
Слепцов С.Д., Саввинова Н.А., Гришин М.А. Таяние льда с учетом селективного источника излучения	114
Томин А.С. Получение гидрата диоксида углерода низкотемпературной конденсацией сверхзвуковых молекулярных пучков	115
Федюшкин А.И. Влияние вибраций на тепло-массообмен при выращивании кристаллов	116
Федюшкин А.И., Бурого Н.Г., Пунтус А.А. Влияние вращения на распределение примеси при выращивании кристаллов	117
Чернов А.А., Левин А.А., Чудновский В.М. Исследование динамики парового пузырька, индуцированного лазерным нагревом недогретой жидкости.....	118
Секция 4. Гидрогазодинамика реагирующих сред, детонационные процессы	
Архипов В.А., Булавко А.М., Жарова И.К., Маслов Е.А., Перфильева К.Г., Ткаченко А.С. Эволюция облака жидко-капельного аэрозоля при осаждении в высокотемпературной среде.....	121
Баев В.К., Бажайкин А.Н. Диффузионное горение газовой струи на преграде из высокопроницаемого пористого материала	122
Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Полечук С.Н. Динамика осаждения кластера полидисперсных твердых частиц в вязкой жидкости.....	123
Быковский Ф.А., Ждан С.А., Ведерников Е.Ф. Непрерывная детонация смесей CH_4/H_2 – воздух при варьировании геометрии кольцевой камеры сгорания	124
Евдокимов О.А., Гурьянов А.И., Калинин К.Л. Исследование динамики закрученных комбинированных реагирующих струй.....	125
Егоров Р.И., Зайцев А.С., Табурчинов Р.И. Аллотермическая газификация углеводородов под действием сфокусированного потока света	126
Зайцев А.С., Егоров Р.И. Особенности свето-индуцированной газификации низкосортных топлив и отходов.....	127
Крикунова А.И. Влияние гравитационных сил на обратное коническое пламя.....	128
Кукшинов Н.В., Батура С.Н. Численное исследование горения водорода в сверхзвуковом потоке окислительной среды в каналах различной конфигурации.....	129
Ларионов К.Б., Мишаков И.В. Влияние неорганической соли на характеристики процессов окисления, зажигания и горения каменного угля	130
Кукшинов Н.В., Батура С.Н., Мамышев Д.Л., Французов М.С. Особенности сверхзвукового течения химически реагирующей водородно-воздушной смеси в модельных камерах сгорания различной геометрической конфигурации.....	131
Мисюра С.Я., Морозов В.С. Скорость кристаллизации в капле и в тонком слое водного раствора соли LiBr	132
Мисюра С.Я., Морозов В.С. Экспериментальное исследование диссоциации природного гидрата метана в потоке воздуха	133
Моисеева К.М., Крайнов А.Ю. Математическое моделирование горения аэровзвеси смеси порошков алюминия и бора.....	134

Кузьмичев Д.Н., Сидоров Р.С. Исследование течения с непрерывно вращающейся детонационной волной в модельной кольцевой камере сгорания	135
Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н. Электроискровое многоочаговое инициирование кольцевых газовых зарядов в воде	136
Трилис А.В. Модовая устойчивость сферического фронта горения Чепмена-Жуге.....	137
Троцюк А.В. Численное исследование двумерной структуры фронта детонации двухтопливных смесей.....	138
Цибульский С.А., Слюсарский К.В., Ларионов К.Б. Исследование физико-химических характеристик горения непищевых твердых бытовых отходов	139
Шапеев В.П., Черепанов А.Н., Исаев В.И. Численное моделирование лазерной сварки разнородных металлов с применением композитных вставок	140
Секция 5. Численные методы в теплофизике и физической гидрогазодинамике	
Артемов В.И., Макаров М.В., Минко К.Б., Яньков Г.Г. Моделирование методом LES турбулентного течения жидкости в круглой трубе при воздействии сил плавучести	143
Белова В.Г., Степанов В.А., Чирков А.Ю. Исследования влияния синтетических струй на снижение тепловых потоков в плоском модельном канале	144
Бендерский Б.Я., Чернова А.А. Нестационарный процесс теплообмена в предопловом объеме многосоплового РДТТ с канално-щелевым зарядом с учетом изменения поверхности горения	145
Борисов Ю.А., Пугачук А.С., Синкевич М.В., Халифе Х. Экспериментальные исследования паровой турбины системы внутрициклового сжатия топлива	146
Гиль А.В., Саломатов В.В., Пузырев Е.М. Трехмерное моделирование горения угля в циркулирующем кипящем слое.....	147
Давыдов М.Н. 148 Динамика концентрации газовой фазы в SPH методе	148
Демышев С.Г., Евстигнеева Н.А., Дымова О.А. Анализ гидрофизических полей в северной части Черного моря на основе ассимиляции в гидродинамической модели данных наблюдений температуры и солености в летний сезон 2016 года.....	149
Дорофеев В.Л., Сухих Л.И. Влияние циркуляции на потоки компонентов морской экосистемы с шельфа в глубоководную часть Черного моря.....	150
Кириловский С.В., Бойко А.В., Демьянко К.В., Иванов А.В., Нечепуренко Ю.М., Поплавская Т.В. Численное моделирование ламинарно-турбулентного перехода на скользящем крыле в дозвуковом потоке	151
Кузнецов В.А., Минаков А.В., Шебелев А.В., Дектерев А.А. Моделирование распыла жидких топлив на основе ELSA модели	152
Куянова Ю.О., Паршин Д.В. Гемодинамика деструктивных нейрохирургических операций: моделирование церебральных сосудов с аневризмой при формировании обходного анастомоза	153
Липовка А.И., Дубовой А.В., Овсянников К.С., Паршин Д.В. Математическое моделирование материала стенки церебральной аневризмы: эксперимент и статистический анализ	154
Лишаев П.Н., Кубряков А.А. Восстановление синоптической изменчивости Черного моря посредством усвоения в модели трехмерных полей псевдоизмерений температуры и солености	155
Мизюк А.И., Пузина О.С. Динамика Азово-Черноморского бассейна на основе параллельной численной модели циркуляции	156
Носков А.С., Фальков А.А., Шипов Д.Л., Лукьянов В.Е., Морозкин О.Н. Анализ гидродинамики потока в условиях смешанной активной зоны	157
Остапенко В.В., Полунина Е.И., Хандеева Н.А. О компактных разностных схемах повышенного порядка слабой аппроксимации	158
Поплавская Т.В., Бойко А.В., Демьянко К.В., Кириловский С.В., Нечепуренко Ю.М. Численное моделирование перехода к турбулентности в задачах обтекания тел при дозвуковых и транзвуковых скоростях внешнего потока.....	159
Савиновский А.С. Использование CFD кода STAR-CCM+ для расчетов режимов кипения в трубах и пучках стержней.....	160
Сендеров М.В., Мизюк А.И., Коротаев Г.К. Исследование процесса формирования халинной стратификации в Черном море по результатам численного моделирования.....	161
Смирнов С.И., Абрамов А.Г., Смирнов Е.М. Численное моделирование конвекции Рэлея-Бнара в круговом цилиндре при введении малых отклонений от осесимметричной постановки	162
Тарасов Н.И., Поляков С.В., Кудряшова Т.А. Расчет трехмерного течения воды с помощью метода двойного потенциала	163
Усов Э.В., Бутов А.А., Климонов И.А., Чухно В.И., Лобанов П.Д. Численное исследование особенностей движения расплава топлива при разрушении ТВЭЛа.....	164
Филимонов С.А., Гаврилов А.А., Дектерев А.А. Реализация метода погруженных границ для решения задач гидродинамики с подвижными телами	165
Фортова С.В., Опарина Е.И., Шепелев В.В., Долуденко А.Н. Численное моделирование течения Колмогорова в вязкой и невязкой средах.....	166
Шульга Т.Я., Свищева И.А., Пластун Т.В. Влияние изменения стратификации и уклонов дна склонно-шельфовых участков Черноморского побережья Крыма на распространение внутренних волн	167

Секция 6. Методы и средства теплофизического и гидрогазодинамического эксперимента

Баталов В.Г., Степанов Р.А., Сухановский А.Н. Оптические методы измерения размеров капель в практических приложениях	171
Бунтин Д.А., Шиплюк М.А. Проблемы измерения теплового потока с помощью тепловизора при импульсном воздействии на образец	172
Ванина В.С., Хе А.К. Обработка данных МРТ и численный эксперимент для исследования винтового характера течения в моделях кровеносных сосудов	173
Гордиенко М.Р., Яворский Н.И., Правдина М.Х., Полякова В.И., Езенева Д.П., Какаулин С.В. Маловозмущающая температурная диагностика вихревой трубы квадратного сечения	174
Громыко Ю.В., Бунтин Д.А., Поливанов П.А. Исследование положения перехода на шероховатых телах затупленной формы при $M=5, 6, 8$	175
Двойнишников С.В., Чубов А.С., Рахманов В.В., Бакакин Г.В., Семенов Д.О. Оценка амплитудно-частотной характеристики оптической системы измерительного комплекса, реализующего метод фазовой триангуляции	176
Жаркова Г.М., Коврижина В.Н. Особенности применения жидкокристаллических композитов для диагностики пристенных течений	177
Зарвин А.Е., Каляда В.В., Яскин А.С., Дубровин К.А., Художитков В.Э., Чиненов С.Т. Использование методов газодинамического эксперимента для моделирования струйных течений космических аппаратов	178
Кабардин И.К., Меледин В.Г., Наумов И.В., Аникин Ю.А., Павлов В.А., Семенов Д.О. Разработка комплексной методики исследования потока в модельной гидротурбине с использованием лазерной анемометрии и видео	179
Кабардин И.К., Яворский Н.И., Меледин В.Г., Правдина М.Х., Гордиенко М.Р., Езенева Д.П., Какаулин С.В., Усов Э.В., Климонов И.А., Кротов С.В., Бакакин Г.В. Экспериментальное определение границ применимости модели турбулентности Спаларта-Алмареса и модели переноса Рейнольдсовых напряжений при интенсификации массопереноса управляемым поворотом-дивергентным потоком	180
Каграманов Ю.А., Рыжков А.Ф., Тупоногов В.Г., Никитин А.Д. Определение кинетических констант взаимодействия сорбентов на основе оксида цинка с компонентами синтез-газа	181
Касымов Д.П., Агафонцев М.В., Рейно В.В., Перминов В.В., Мартынов П.С. Разработка методики оценки пожароопасных характеристик и теплоизолирующей способности строительных конструкций из древесины с помощью приборов инфракрасной техники	182
Кондратьев А.В., Птахин А.В., Крылов В.С., Корлякова Е.Ю. Измерения при промышленных испытаниях воздушных конденсаторов и сухих градиентных	183
Куликов Д.В., Чубов А.С., Садбаков О.Ю., Кротов С.В., Овчинников Н.Н. Метод измерения геометрии вращающихся частей энергетических установок на основе эффекта самосмещения лазерного излучения	184
Куприянов А.В., Молодцов А.А., Осин А.Б., Сорокин В.Д., Морозкин О.Н. Экспериментальные исследования критических тепловых потоков на электрообогреваемых моделях ТВСА	185
Малахов А.О., Ларионов В.М. Влияние амплитуды акустических колебаний на распределение скорости звука в вихревой камере пульсационного горения	186
Маслов Н.А., Анискин В.М., Коротаева Т.А., Цибульская Е.О. Сравнение тепловизионного и флуоресцентного методов определения температуры нагреваемой пластины для исследования теплоотдачи при натекании сверхзвуковой микроструи воздуха	187
Овчинников Н.Н., Двойнишников С.В., Главный В.Г., Садбаков О.Ю., Щепихин И.В. Метод минимизации ошибки калибровки триангуляционного измерителя трехмерной геометрии с двумя фотоприемниками	188
Рахманов В.В., Аникин Ю.А., Куликов Д.В., Павлов В.А., Щепихин И.В. Расширение динамического диапазона фотоприемников в гидродинамических исследованиях на основе применения активных оптических затворов	189
Чертовских П.А., Серёдкин А.В., Гобызов О.А., Стюф А.С., Пашкевич М.Г., Токарев М.П. Об опыте построения интеллектуальных регуляторов физико-химическими процессами в теплотехническом оборудовании	190

Секция 7. Теплофизические свойства веществ и новые материалы

Агажанов А.Ш., Савченко И.В., Абдуллаев Р.Н., Станкус С.В. Теплопроводность сплава Cs-Bi в жидком состоянии	193
Архипов В.А., Жарова И.К., Гольдин В.Д., Перфильева К.Г., Романдин В.И., Кузнецов В.Т. Измерение интегрального коэффициента излучения поверхности теплозащитных материалов	194
Барбин Н.М., Дан В.П., Терентьев Д.И., Алексеев С.Г. Определение теплофизических параметров фуллеренов C_{32}	195
Костоград И.А., Бойко Е.В. Влияние кристаллографических ориентаций зерен медной подложки на рост графена	196

Бойко Е.В., Костогруд И.А., Смовж Д.В. Исследование полимер-графеновых композитов с наночастицами золота	197
Вендланд Л.Е., Волков-Музылев В.В., Демидов А.Н., Борисов Ю.А. Испытания пластиков PLA при комнатной температуре	198
Ибраева К.Т., Табакаев Р.Б., Заворин А.С. Свойства твердых продуктов пиролиза различных видов биомассы	199
Лепешкин А.Р., Ильинская О.И. Методы исследований лопаток турбин с ТЗП для перспективных ГТД.....	200
Романов И.А., Борзенко В.И., Казаков А.Н. Использование пены-меди для улучшения теплопроводности засыпки интерметаллида $\text{La}_{0.9}\text{Ce}_{0.1}\text{Ni}_5$ при взаимодействии с водородом.....	201
Сахипгареев А.Р., Морозов А.В. Исследование теплофизических и физико-химических свойств растворов борной кислоты применительно к аварийному охлаждению активной зоны ВВЭР.....	202
Смовж Д.В. Влияние химического взаимодействия на морфологию металл-углеродных композитов формирующихся в графитовой дуге	203
Станкус С.В., Савченко И.В., Яцук О.С. Калорические свойства эквипотенциального сплава системы рубидий – висмут в интервале температур 293–1175 К.....	204
Счастливцев А.И., Дуников Д.О., Борзенко В.И. Экспериментальное исследование теплофизических свойств продуктов сгорания в водородосжигающих установках.....	205
Секция 8. Тепломассообмен и гидродинамика на микро- и наномасштабах	
Абрамова О.А., Гимадеев А.В., Питюк Ю.А., Искандаров А.И. Трехмерное моделирование течения вязкой жидкости и динамики капель эмульсии в микроструктурах различной геометрии	209
Анисимова И.В., Игнатьев А.В. Вычислительные технологии определения столкновительной части уравнения Больцмана.....	210
Анискин В.М., Маслов Н.А., Цибульская Е.О., Коротаева Т.А. Определение коэффициентов теплоотдачи при натекании сверхзвуковой микроструи на нагреваемую поверхность с использованием флуоресцирующих покрытий.....	211
Бабенко Д.Д., Дмитриев А.С., Михайлова И.А. Термогидродинамические процессы испарения и кипения на поверхностях функциональных наноматериалов	212
Гимадеев А.В., Абрамова О.А., Питюк Ю.А., Фаткуллина Н.Б. Численное моделирование гидродинамических потоков в микроструктурах сложной геометрии с применением метода граничных элементов.....	213
Гузей Д.В., Минаков А.В., Пряхников М.И. Анализ эффективности применения наножидкостей для интенсификации теплообмена в ламинарном режиме течения.....	214
Дмитриев А.С., Ивлев Н.Ф., Михайлова И.А. Генерация пара в графеновых наножидкостях под действием планковского солнечного спектра излучения	215
Емельянов А.А., Ребров А.К., Тимошенко Н.И., Юдин И.Б. Определение параметров осаждения при струйном осаждении алмаза.....	216
Емельянов А.А., Плотников М.Ю., Юдин И.Б. Зондовая подача метана при газоструйном синтезе алмазных структур	217
Искандаров А.И., Замула Ю.С., Саметов С.П., Абрамова О.А., Батыршин Э.С., Питюк Ю.А. Экспериментальное изучение особенностей течения жидкости в микроканалах с неровными стенками.....	218
Михиенкова Е.И., Минаков А.В., Пряхников М.И. Экспериментальное исследование зависимости вязкости буровых растворов с наночастицами от температуры	219
Роньшин Ф.В., Дементьев Ю.А., Чиннов Е.А. Двухфазные течения в прямоугольных мини- и микроканалах.....	220
Сафонов А.И., Тимошенко Н.И., Суляева В.С., Старинский С.В. Влияние отжига на процесс синтеза наночастиц золота в композитном фторполимерном покрытии, полученном комбинацией методов вакуумного газоструйного осаждения и HW CVD	221
Тухбатова Э.Р., Замула Ю.С., Валиуллина В.И., Мусин А.А., Ковалева Л.А. Исследование динамики дисперсных систем в ячейке прямоугольного сечения при подогреве ее граней.....	222
Секция 9. Электрофизические явления в газовых и жидких средах	
Барышников А.С., Басаргин И.В., Безверхний Н.О., Бобашев С.В., Монахов Н.А., Попов П.А., Сахаров В.А., Чистякова М.В. Особенности зондовых измерений в плазме электродного разряда.....	225
Знаменская И.А., Иванов И.Э., Татаренкова Д.И. Локализация комбинированного импульсного разряда в течении газа с прямоугольным препятствием на стенке канала.....	226
Зубарева О.В., Зубарев Н.М. Точные решения для равновесных форм струи проводящей жидкости во внешнем поперечном электрическом поле.....	227
Куперштох А.Л., Медведев Д.А. Динамика пузырьков в жидком диэлектрике под действием электрического поля: метод решеточных уравнений Больцмана.....	228
Медведев Р.Н., Савенко Р.А., Чуркин Д.С. Спектральные характеристики водной индуктивно-связанной плазмы при средних давлениях.....	229

Мередова М.Б., Карпов Д.И. Моделирование пространственной структуры частичного разряда в гелиевом пузырьке	230
Перебудин С.И., Перебудина Э.С., Холодова С.Е. Влияние диссипативных эффектов на динамические процессы во вращающейся электропроводящей жидкой среде	231
Перебудин С.И., Перебудина Э.С., Холодова С.Е. Влияние интенсивности турбулентной диффузии плотности на магнитогидродинамические процессы в сферическом слое	232
Ренев М.Е., Стишков Ю.К., Сафронова Ю.Ф. Особенности диффузного барьерного разряда в случае униполярного импульса напряжения длительностью 500 наносекунд	233
Ридель А.В., Коробейников С.М., Овсянников А.Г., Карпов Д.И. Исследование влияния рентгеновского излучения на частичные разряды в газовых пузырьках	234
Штерцер А.А., Ульяницкий В.Ю., Батраев И.С. Капиллярная электропроводность детонационных алюмооксидных покрытий	235
Секция 10. Теплообмен и гидродинамика в технологических процессах и защита окружающей среды	
Алексеев С.В., Шадрин Е.Ю., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Бойко Е.Е. Внутренняя аэродинамика модели усовершенствованной четырехвихревой топки	239
Алтынбаева Д.Б., Астафьев А.В., Табакаев Р.Б. Исследование термического преобразования соломы: связь между выходом продуктов и тепловым эффектом пиролиза	240
Ануфриев И.С., Шадрин Е.Ю., Копьев Е.П., Мухина М.А. Изучение характеристик блока распыла жидкотопливного горелочного устройства методом IPI	241
Васильев А.Ю., Гольцев В.Ф., Кауфман С.В., Майорова А.И., Фурлетов В.И. Разработка струйного фронтального модуля с обращенной LPP схемой сжигания жидких топлив	242
Васильев А.Ю., Домрина Е.С., Майорова А.И. Классификация форсунок	243
Вершинина К.Ю., Дорохов В.В., Романов Д.С. Отличия характеристик и условий сжигания водоугольного топлива и суспензий на основе промышленных и бытовых отходов	244
Волгин В.С., Гиневский А.Ф. Численное исследование солнечного термоэлектрического генератора на базе вакуумных коллекторов	245
Деев Равад (Сирия), Сиденков Д.В. Расчет теплообмена в пучке труб каплевидной формы	246
Дехтярь Р.А., Овчинников В.В. Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена при фильтрации жидкости через пористую вставку	247
Дуников Д.О., Блинов Д.В. Анализ эффективности извлечения водорода из смесей с метаном с помощью металлгидридов	248
Дуников Д.О., Блинов Д.В. Особенности измерения изотерм абсорбции водорода в металлгидридном реакторе	249
Елистратов С.Л., Миронова Н.В. Моделирование испарения смесей и растворов в сфероидальном состоянии	250
Козлов А.Н. Кинетика термохимической конверсии древесной биомассы	251
Кубряков А.И., Белокопытов В.Н. Моделирование климатической сезонной циркуляции вод в Севастопольской бухте	252
Кузнецов Г.В., Стрижак П.А., Войтков И.С., Волков Р.С. Определение размеров капель, образующихся вследствие разрушения жидкостных массивов	253
Кузнецов Г.В., Толокольников А.А., Чередник И.В., Янковский С.А. Обоснование возможности утилизации мандариновой цедры в составе смесевых топлив на основе каменного угля	254
Кузнецов Г.В., Чередник И.В., Толокольников А.А., Янковский С.А. Зажигание пеллетированных смесевых топлив на основе бурого угля и отходов лесопиления	255
Лобасов А.С., Минаков А.В., Пряхников М.И. Исследование влияния объемной концентрации наночастиц на краевой угол смачивания поверхности наножидкостью	256
Миринов С.В., Комов А.Т., Варава А.Н., Дедов А.В., Люблинский И.Е., Вертков А.В., Захаренков А.В., Локтионов В.Д., Сморгачева Ю.В. Охлаждение внутрикамерных элементов термоядерного реактора диспергированным потоком	257
Мусакаев Н.Г., Бородин С.Л. Расчет параметров нисходящего парожидкостного потока в стволе нагнетательной скважины	258
Назарычев С.А., Сайфуллин Э.Р., Ларионов В.М. Влияние состава смеси метана, пропана и бутана на процессы горения и теплообмена в экспериментальной водонагревательной установке	259
Немировский Ю.В., Мозгова А.С. Двумерная стационарная задача теплопроводности для тепловых сетей	260
Петрушин А.А., Птахин А.В., Крылов В.С., Каргуесова А.Ю. Комбинированный сепаратор для подогрева, охлаждения воздуха и удаления влаги на всасывающих устройствах воздухоочистки	261
Ратнер Ю.Б., Холод А.Л. Исследование пространственно-временной изменчивости толщины верхнего квазигомогенного слоя черного моря на основе результатов численного моделирования	262
Слесарева Е.Ю., Дехтярь Р.А., Овчинников В.В. Движение одиночного парового пузыря Тейлора в вертикальной трубе малого диаметра	263

Серёдкин А.В., Токарев М.П., Плохих И.А., Гобызов О.А., Маркович Д.М. Разработка метода детектирования и классификации мусора на конвейере для создания системы роботизированной сортировки	264
Филиппов П.С., Толмачев Е.М., Ефимовых И.С., Рыжков А.Ф. Влияние теплофизических параметров рабочего тела на работу газотурбинного цикла	265
Холод А.Л., Ратнер Ю.Б., Иванчик М.В. Сопоставление результатов прогнозов температуры поверхности Черного моря, полученных в ФГБУН МГИ и службе Copernicus	266
Штым К.А., Соловьёва Т.А., Кулик А.В. Исследование распределения температурных полей в циклонном предтопке	267

Авторский указатель

- Абдуллаев Р.Н. 193
 Абрамов А.Г. 162
 Абрамова О.А. 59, 88, 209, 213, 218
 Авдеев А.А. 99
 Агажанов А.Ш. 193
 Агафонцев М.В. 182
 Актершев С.П. 54
 Александров В.Ю. 46, 74
 Алексеев Р.А. 53, 87
 Алексеев С.Г. 195
 Алексеенко С.В. 239
 Алтынбаева Д.Б. 240
 Аль-Музайкер М. 55
 Аникин Ю.А. 179, 189
 Анисимова И.В. 210
 Анискин В.М. 31, 47, 187, 211
 Антонникова А.А. 56
 Ануфриев И.С. 239, 241
 Артемов В.И. 143
 Архипов В.А. 121, 194
 Астафьев А.В. 240
 Афанасьев Е.П. 75
 Ашихмин А.Е. 57
 Бабенко Д.Д. 212
 Баев В.К. 122
 Бажайкин А.Н. 122
 Байдаков В.Г. 100
 Бакакин Г.В. 176, 180
 Барбин Н.М. 195
 Барташевич М.В. 65, 77
 Барышников А.С. 225
 Басалаев С.А. 56, 123
 Басаргин И.В. 225
 Баталов В.Г. 171
 Батраев И.С. 235
 Батура С.Н. 129, 131
 Батыршин Э.С. 218
 Безверхний Н.О. 225
 Белова В.Г. 144
 Белокопытов В.Н. 252
 Белослудов В.Р. 101, 102, 104
 Беляев И.А. 15, 27, 48
 Бендерский Б.Я. 145
 Бирюков Д.А. 48
 Блинов Д.В. 248, 249
 Бобашев С.В. 225
 Божко Ю.Ю. 101, 102, 104, 105
 Бойко А.В. 151, 159
 Бойко Е.В. 196, 197
 Бойко Е.Е. 239
 Болдырева О.Ю. 5
 Бондарева Н.С. 16
 Борзенко В.И. 201, 205
 Борзенко Е.И. 58
 Борисов Ю.А. 146, 198
 Бородин С.Л. 258
 Бородулин В.Ю. 103
 Булавко А.М. 121
 Булатова А.З. 59, 88
 Булгакова Г.Т. 60
 Булина Н.В. 110
 Бунтин Д.А. 172, 175
 Бураго Н.Г. 117
 Бусов К.А. 61
 Бутов А.А. 164
 Быковский Ф.А. 124
 Ваганова Н.А. 89
 Валиуллина В.И. 222
 Ванина В.С. 173
 Варава А.Н. 257
 Васильев А.Ю. 242, 243
 Вдовин М.И. 62
 Ведерников Е.Ф. 124
 Вендланд Л.Е. 198
 Веретенников С.В. 67
 Вертков А.В. 257
 Вершинина К.Ю. 244
 Виноградов Д.А. 17, 63
 Войтков И.С. 253
 Волгин В.С. 245
 Волков Р.С. 253
 Волков-Музылев В.В. 198
 Габдрафиков А.Ф. 71
 Гаврилов А.А. 165
 Гаврилов И.Ю. 53, 87
 Гайнетдинов Э.Ф. 71
 Гатаулин Я.А. 18
 Гвоздяков Д.В. 64
 Генин Л.Г. 15
 Герасимов А.В. 19
 Гец К.В. 102, 104, 105
 Гибанов Н.С. 20
 Гиль А.В. 147
 Гимадеев А.В. 70, 209, 213
 Гиневский А.Ф. 245
 Главный В.Г. 188
 Глезер В.В. 65, 77
 Глотов В.Ю. 21
 Гобызов О.А. 190, 264
 Головизнин В.М. 21
 Гольдин В.Д. 194
 Гольцев В.Ф. 242
 Гольцман А.Е. 22, 40, 66
 Гордиенко М.Р. 174, 180
 Грибин В.Г. 53, 87
 Гришин М.А. 114
 Громыко Ю.В. 175
 Губайдуллин А.А. 5
 Губин В.Е. 64
 Гузей Д.В. 214
 Гурьянов А.И. 67, 125
 Гурьянов М.М. 67
 Давлетшин И.А. 22
 Давыдов М.Н. 148
 Дан В.П. 195
 Двойнишников С.В. 176, 188
 Дедов А.В. 257
 Деев Равад 246
 Дектерев А.А. 152, 165
 Дектерев Ал.А. 36
 Дектерев Ар.А. 36
 Дектерев Д.А. 36
 Дементьев Ю.А. 220
 Демидов А.Н. 198
 Демьшев С.Г. 149
 Демьянко К.В. 151, 159
 Дехтярь Р.А. 247, 263
 Диева Н.Н. 68
 Дмитриев А.С. 6, 212, 215
 Долуденко А.Н. 166
 Домрина Е.С. 243
 Дорофеев В.Л. 150
 Дорохов В.В. 244
 Дрожжин А.П. 136
 Дубовой А.В. 154
 Дубровин К.А. 178
 Дуников Д.О. 205, 248, 249
 Душин Н.С. 32
 Дымова О.А. 149
 Дьяченко А.Ю. 43
 Евдокимов О.А. 67, 125
 Евстигнеева Н.А. 149
 Евтюхин А.В. 68
 Егоров Р.И. 126, 127
 Езендеева Д.П. 174, 180
 Елистратов С.Л. 250
 Емельянов А.А. 216, 217
 Есенбаев Т.Е. 23
 Ефимов В.Б. 26
 Ефимовых И.С. 265
 Жаркова Г.М. 177
 Жарова И.К. 121, 194
 Ждан С.А. 124
 Жданов Р.К. 101, 104, 105
 Заворин А.С. 199
 Зайцев А.С. 126, 127
 Залкинд В.И. 69
 Замула Ю.С. 70, 218, 222
 Зарвин А.Е. 178
 Захаренков А.В. 257
 Зейгарник Ю.А. 69
 Зенков А.В. 64
 Зиннатуллин Р.Р. 71, 85
 Знаменская И.А. 226
 Золоторёв Н.Н. 56, 123
 Зубарев Н.М. 7, 227
 Зубарева А.Н. 106
 Зубарева О.В. 7, 227
 Ибраева К.Т. 199
 Иванов А.В. 151
 Иванов И.Э. 226
 Иванова Н.А. 23, 55, 73
 Иванчик М.В. 266
 Ивлев Н.Ф. 215
 Ивочкин Ю.П. 17, 63
 Игнатьев А.В. 210
 Ильинская О.И. 200
 Исаев В.И. 140
 Исаев С.А. 8
 Исаенков С.В. 91
 Искандаров А.И. 209, 218
 Кабардин И.К. 179, 180
 Каграманов Ю.А. 181
 Казаков А.Н. И 201
 Какаулин С.В. 174, 180

- Калинина К.Л. 67, 125
 Каляда В.В. 178
 Канаев А.А. 21
 Капитунов О.А. 61
 Карпов Д.И. 230, 234
 Картусова А.Ю. 261
 Касымов Д.П. 182
 Кауфман С.В. 242
 Кашкарова М.В. 72
 Кильдибаева С.Р. 90
 Кириловский С.В. 151, 159
 Кирпичников А.П. 19
 Киселев А.Е. 21
 Климонов И.А. 164, 180
 Ключев Д.С. 73
 Князева А.Г. 78
 Ковалева Л.А. 70, 71, 85, 222
 Коврижина В.Н. 177
 Козлов А.Н. 251
 Козулин И.А. 107
 Колодежнов В.Н. 24, 25
 Комов А.Т. 257
 Кондаков В.Г. 21
 Кондаурова Л.П. 26
 Кондратьев А.В. 183
 Копьев Е.П. 241
 Корлякова Е.Ю. 183
 Коробейников С.М. 234
 Королева А.П. 74
 Коротаев Г.К. 9, 161
 Коротаева Т.А. 187, 211
 Костогруд И.А. 196, 197
 Котляр А.В. 27
 Кравченко М.Н. 68
 Крайнов А.Ю. 134
 Крета А.С. 95
 Крикунова А.И. 128
 Кротов С.В. 180, 184
 Крылов В.С. 183, 261
 Крюков А.П. 112
 Кубриков К.Г. 63, 99
 Кубряков А.А. 155
 Кубряков А.И. 252
 Кудряшова Т.А. 163
 Кузнецов В.А. 152
 Кузнецов В.В. 10, 107
 Кузнецов В.Т. 194
 Кузнецов Г.В. 253, 254, 255
 Кузьмичев Д.Н. 135
 Кукшинов Н.В. 129, 131
 Куликов Д.А. 49
 Куликов Д.В. 184, 189
 Куперштох А.Л. 228
 Куприянов А.В. 185
 Куянова Ю.О. 153
 Лавров В.В. 106
 Лаптев А.Г. 75
 Ларионов В.М. 186, 259
 Ларионов К.Б. 130, 139
 Лебеда К.С. 108
 Левин А.А. 109, 118
 Леманов В.В. 28
 Лепешкин А.Р. 200
 Летушко В.Н. 103
 Липовка А.И. 154
 Листратов Я.И. 27
 Литвинов И.В. 42
 Лишаев П.Н. 155
 Лищук А.Н. 68
 Лобанов П.Д. 164
 Лобасов А.С. 36, 256
 Логинов А.В. 49
 Локтионов В.Д. 257
 Лукашов В.В. 28
 Лукьянов В.Е. 157
 Лучинкин Н.А. 38
 Люблинский И.Е. 257
 Мажейко Н.А. 61
 Майорова А.И. 242, 243
 Макаров М.В. 143
 Макаров М.С. 29, 108
 Макарова С.Н. 29, 108
 Максимов В.М. 76
 Малахов А.О. 186
 Маликов А.Г. 110
 Мамышев Д.Л. 131
 Манаков А.Ю. 84, 111
 Маркович Д.М. 264
 Мартынов П.С. 30, 182
 Маслов А.А. 31
 Маслов Е.А. 121
 Маслов Н.А. 187, 211
 Матвиенко О.В. 30
 Медведев Д.А. 228
 Медведев Р.Н. 136, 229
 Меледин В.Г. 179, 180
 Мелешкин А.В. 65, 77
 Мередова М.Б. 230
 Месяц Г.А. 7
 Мизюк А.И. 156, 161
 Минаков А.В. 36, 81, 152, 214, 219, 256
 Минко К.Б. 143
 Мирнов С.В. 257
 Миронов С.Г. 31, 47
 Миронова Н.В. 250
 Мисюра С.Я. 132, 133
 Михайлова И.А. 212, 215
 Михеев А.Н. 33
 Михеев Н.И. 32, 33, 40
 Михиенкова Е.И. 219
 Мишаков И.В. 130
 Мозгова А.С. 260
 Моисеева К.М. 134
 Молодцов А.А. 185
 Молочников В.М. 33
 Монахов Н.А. 225
 Морозкин О.Н. 157, 185
 Морозов А.В. 83, 202
 Морозов В.С. 132, 133
 Мулладжанов Р.И. 35, 39
 Мурадов А.В. 68
 Мусакаев Н.Г. 5, 90, 258
 Мусин А.А. 70, 222
 Мухина М.А. 241
 Назаренко Н.Н. 78
 Назарычев С.А. 259
 Наумкин В.С. 34
 Наумов И.В. 72, 93, 179
 Немировский С.К. 79
 Немировский Ю.В. 260
 Нечепуренко Ю.М. 151, 159
 Низовский В.Л. 69
 Низовский Л.В. 69
 Низовцев М.И. 34, 103
 Никитин А.Д. 181
 Ничик М.Ю. 86
 Носков А.С. 157
 Овсянников А.Г. 234
 Овсянников К.С. 154
 Овчинников В.В. 247, 263
 Овчинников Н.Н. 184, 188
 Опарина Е.И. 166
 Оришич А.М. 110
 Осин А.Б. 185
 Остапенко В.В. 158
 Павленко А.Н. 11
 Павлов В.А. 179, 189
 Палкин Е.В. 35
 Паршин Д.В. 153, 154
 Пашкевич М.Г. 190
 Первунин К.С. 86
 Перегудин С.И. 231, 232
 Перегудина Э.С. 231, 232
 Перминов В.В. 182
 Перфильева К.Г. 56, 121, 123, 194
 Петрушин А.А. 261
 Пискунов М.В. 57
 Питюк Ю.А. 59, 88, 209, 213, 218
 Пластун Т.В. 167
 Платонов Д.В. 36
 Плотников М.Ю. 217
 Плохих И.А. 264
 Поленчук С.Н. 123
 Поливанов П.А. 175
 Полудницин А.Н. 37
 Полунина Е.И. 158
 Поляков С.В. 163
 Полякова В.И. 174
 Пономаренко Т.Г. 80
 Поплавская Т.В. 151, 159
 Поплавский С.В. 81
 Попов В.В. 53, 87
 Попов П.А. 225
 Правдина М.Х. 174, 180
 Пряжников М.И. 214, 219, 256
 Птахин А.В. 183, 261
 Пугачук А.С. 146
 Пузина О.С. 156
 Пузина Ю.Ю. 112
 Пузырев Е.М. 147
 Пунтус А.А. 117
 Пятницкая Н.Ю. 15
 Рагулин С.В. 83
 Разуванов Н.Г. 15, 38
 Ратнер Ю.Б. 262, 266
 Рахманов В.В. 176, 189
 Ребров А.К. 216
 Рейно В.В. 182
 Ренев М.Е. 233
 Решетников А.В. 61
 Ридель А.В. 234

- Рожков А.Н. 113
 Романдин В.И. 194
 Романов Д.С. 244
 Романов И.А. 201
 Роньшин Ф.В. 94, 220
 Росуховский Д.А. 18
 Рыжников В.О. 39
 Рыжков А.Ф. 181, 265
 Сабирова Ф.Р. 19
 Саввинова Н.А. 114
 Савенко Р.А. 229
 Савиновский А.С. 160
 Савченко И.В. 193, 204
 Сагидуллин А.К. 111
 Садбаков О.Ю. 184, 188
 Садыкова А.Г. 7
 Сажин И.А. 82
 Сайфуллин Э.Р. 259
 Саломатов В.В. 147
 Саметов С.П. 218
 Сардов П.А. 38
 Саушин И.И. 22, 32, 33, 40, 66
 Сафонов А.И. 221
 Сафронова Ю.Ф. 233
 Сахаров В.А. 225
 Сахипгареев А.Р. 83, 202
 Свешников Д.Н. 49
 Свиридов В.Г. 15, 27
 Свищева И.А. 167
 Семенов Д.О. 176, 179
 Сендеров М.В. 161
 Сентябов А.В. 36
 Сергеев Д.А. 62
 Серёдкин А.В. 190, 264
 Сиденков Д.В. 246
 Сидоров Р.С. 135
 Синкевич М.В. 146
 Скиба С.С. 84
 Слепцов С.Д. 114
 Слесарева Е.Ю. 263
 Слюсарский К.В. 139
 Смирнов Е.М. 162
 Смирнов С.И. 18, 162
 Смовж Д.В. 197, 203
 Сморгкова Ю.В. 257
 Смольский Я.И. 43
 Сорокин В.Д. 185
 Станкус С.В. 193, 204
 Старинский С.В. 221
 Степанов В.А. 144
 Степанов Р.А. 171
 Стерлягов А.Н. 103
 Стишков Ю.К. 233
 Столповский М.В. 90
 Стопорев А.С. 111
 Стрижак П.А. 253
 Ступникова А.В. 41
 Стюф А.С. 190
 Субботин О.С. 101, 102, 104, 105
 Султангужин Р.Ф. 71, 85
 Суляева В.С. 221
 Суслов Д.А. 42
 Сухановский А.Н. 171
 Сухих Л.И. 150
 Счастливец А.И. 205
 Табакаев Р.Б. 199, 240
 Табурчинов Р.И. 126
 Тарасов Н.И. 163
 Татаренкова Д.И. 226
 Тепляков И.О. 17, 63
 Терентьев Д.И. 195
 Терехов В.В. 44, 45
 Терехов В.И. 43, 44
 Тесленко В.С. 136
 Тимошевский М.В. 86
 Тимошенко Н.И. 216, 221
 Тищенко А.А. 53, 87
 Тищенко В.А. 53, 87
 Ткаченко А.С. 121
 Токарев М.П. 190, 264
 Толмачев Е.М. 265
 Толокольников А.А. 254, 255
 Томин А.С. 115
 Трилис А.В. 137
 Троицкая Ю.И. 62
 Троцюк А.В. 138
 Тупоногов В.Г. 181
 Тухбатова Э.Р. 222
 Ульяницкий В.Ю. 235
 Усанина А.С. 56
 Усов Э.В. 164, 180
 Уткин А.В. 106
 Фальков А.А. 157
 Фарахов Т.М. 75
 Фаткуллина Н.Б. 59, 88, 213
 Федюшкин А.И. 116, 117
 Филимонов М.Ю. 89
 Филимонов С.А. 165
 Филиппов М.В. 44, 45
 Филиппов П.С. 265
 Флягин В.М. 23, 55, 73
 Фортова С.В. 166
 Французов М.С. 46, 74, 131
 Фурлетов В.И. 242
 Халифе Х. 146
 Хандеева Н.А. 158
 Хасанов М.К. 90
 Хе А.К. 173
 Хегай Е.И. 58
 Холод А.Л. 262, 266
 Холодова С.Е. 231, 232
 Хомутов Н.А. 57
 Художитков В.Э. 178
 Цибульская Е.О. 187, 211
 Цибульский С.А. 139
 Цырюльников И.С. 47
 Чеверда В.В. 80, 94
 Черданцев А.В. 91
 Черданцев М.В. 91
 Чередник И.В. 254, 255
 Черепанов А.Н. 140
 Чернов А.А. 118
 Чернова А.А. 145
 Черныш Д.Ю. 48
 Чертовских П.А. 190
 Чиненов С.Т. 178
 Чиннов Е.А. 54, 94, 220
 Чирков А.Ю. 144
 Чистякова М.В. 225
 Чохар И.А. 44, 45
 Чубов А.С. 176, 184
 Чудновский В.М. 118
 Чуркин Д.С. 229
 Чухно В.И. 164
 Шадрин Е.Ю. 239, 241
 Шакиров Р.Р. 32
 Шапеев В.П. 140
 Шарифулин А.Н. 37, 41
 Шарифуллин А.Р. 60
 Шарифуллин Б.Р. 93
 Шаров К.А. 28
 Шарыпов К.А. 7
 Шарыпов О.В. 239
 Шатский Е.Н. 54
 Шебелев А.В. 152
 Шебелева А.А. 81
 Шепелев В.В. 166
 Шеремет М.А. 16, 20
 Шиплюк М.А. 172
 Шипов Д.Л. 157
 Шмелев Е.И. 49
 Шпак В.Г. 7
 Шрагер Г.Р. 58
 Штерцер А.А. 235
 Шторк С.И. 42
 Шульга Т.Я. 167
 Шумейко В.А. 82
 Шунайлов С.А. 7
 Щепихин И.В. 188, 189
 Щигель С.С. 69
 Элоян К.С. 94, 95
 Юдин И.Б. 216, 217
 Юлмухаметова Р.Р. 70
 Юхнев А.Д. 18
 Яворский Н.И. 174, 180
 Яландин М.И. 7
 Янковский С.А. 254, 255
 Яновский В.А. 57
 Яньков Г.Г. 143
 Яскин А.С. 178
 Яцук О.С. 204
 Ячевский И.А. 112

Ответственные за выпуск
к.ф.-м.н. М.С. Макаров
к.ф.-м.н. В.С. Наумкин

Вёрстка
А.В. Мартынец

Подписано в печать 19.08.2019 г. Печать офсетная.
Бумага офсетная. Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 29.
Тираж 230 экз.

Отпечатано в типографии «Срочная полиграфия»
ИП Малыгин Алексей Михайлович
630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6, оф. 104
Тел. (383) 217-43-46, 8-913-922-19-07



Ждём вас
всех
с Банни!

