

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Рандина Вячеслава Валерьевича «Гидродинамическая структура и теплообмен двухфазных газожидкостных потоков», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Рандина Вячеслава Валерьевича посвящена экспериментальному исследованию гидродинамики и теплообмена в газожидкостных потоках в каналах различной конфигурации и в различных режимах течения.

Эксперимент является одой из основных составляющих науки. По экспериментальным данным оценивают правильность теоретических гипотез, работоспособность разработанных установок. В науке постоянно ощущается нехватка экспериментальных данных. Связано это со сложностью подготовки и проведения экспериментов, нехваткой или несовершенством измерительного оборудования. Экспериментальная теплофизика является важным разделом науки, находящимся на стыке теплофизики и приборостроения. В этой связи тема диссертации является актуальной и представляет несомненный научный и практический интерес.

Автором разработано экспериментальное оборудование, методика его применения в экспериментах по изучению восходящего и опускающего пузырькового течения в вертикальной трубе, снарядных потоков. Получены новые экспериментальные данные, имеющие важное научное значение. Прежде всего, к ним следует отнести следующее:

- Модификация методики измерений локальных гидродинамических характеристик газожидкостных течений на основе электродиффузионного метода. Оценка степени влияния порога дискриминации газовой фазы на результаты измерений. Оценка влияния параметров осреднения на значения

средних и пульсационных компонент трения и скорости. Адаптация метода для измерений в пристенной зоне течений. Оценка погрешности электродиффузионного метода измерения.

- Экспериментальное исследование гидродинамической структуры опускного газожидкостного пузырькового потока в турбулентном режиме течения в широком диапазоне режимных параметров. Измерение средних и пульсационных характеристик течения. Исследование пристенной зоны течения. Изучение влияния малых добавок газа на течение жидкости.
- Экспериментальное исследование опускного пузырькового течения в «псевдоламинарном режиме» при докритических числах Рейнольдса жидкости. Исследование осредненной и пульсационной структуры течения. Сравнение результатов с известными в литературе результатами численного моделирования таких течений.
- Реализация метода условного осреднения по ансамблю для исследования структуры восходящего снарядного течения в трубе. Выбор критерия для идентификации газовых снарядов и пузырей.
- Экспериментальное исследование восходящего снарядного течения в трубе. Измерение профилей скорости жидкости в жидких пробках с использованием методики условного осреднения. Исследование изменения скорости по длине жидкой пробки. Измерение эволюции трения на стенке в пленке жидкости вокруг газового снаряда по мере движения снаряда.
- Отработка методики измерения характеристик дисперсности газовой фазы на основе скоростной видеосъемки. Разработка алгоритмов вычисления размеров газовых включений по анализу изображений. Отработка методики измерений локальной теплоотдачи к потоку в режиме постоянного теплового потока. Оценка погрешности измерений.
- Экспериментальное исследование гидродинамики и теплоотдачи от стенки в пузырьковом течении в наклонном прямоугольном плоском канале с переменным углом наклона. Измерение трения на стенке и коэффициента теплообмена при различных углах наклона и различных расходах фаз.

Наибольшую научно-практическую значимость имеют следующие результаты работы:

- Разработана методика проведения комплексного экспериментального исследования гидродинамической структуры двухфазных газожидкостных течений в различных условиях, и детального изучения структуры пристенной области в различных режимах.
- Впервые получены экспериментальные данные о гидродинамической структуре опускающего пузырькового течения в развитом турбулентном режиме, включая пристенную зону течения.
- Показано наличие механизмов демпфирования турбулентных пульсаций в пристенной зоне газожидкостного потока. Показано существенное влияние дисперсности газовой фазы на пульсационные характеристики трения и скорости.
- Впервые получены экспериментальные данные о структуре опускающего пузырькового течения при докритических числах Рейнольдса жидкой фазы. Показано качественное подобие структур течения в развитом турбулентном и псевдоламинарном режимах.
- Получены результаты исследования восходящего снарядного течения методом условного осреднения по ансамблю реализаций. Получена осредненная структура течения в жидких пробках и в пленках жидкости вокруг газовых снарядов.
- Получены новые результаты по трению и теплообмену в пузырьковом газожидкостном течении в прямоугольном канале при различных углах наклона. Показано, что наиболее существенное влияние газовой фазы наблюдается при промежуточных углах наклона относительно вертикали.
- Показано значительное влияние малых концентраций газовой фазы на гидродинамические характеристики и теплообмен пузырькового течения в различных условиях.

В целом, диссертация В.В. Рандина выстроена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к научным текстам. Стил изложения ясный,

лаконичный; качество оформления – хорошее. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и библиографического списка из 164 наименований. Общий объем диссертации 214 страницы.

Во введении обоснована актуальность темы и цель научная и практическая новизна и ценность работы; приведены сведения о личном вкладе и публикациях автора, апробации на Российских и международных конференциях.

В первой главе проведен обширный обзор отечественных и зарубежных исследования гидродинамики пузырьковых и снарядных двухфазных потоков, а также методах их диагностики. Показано, что к методам и средствам диагностики неоднородных сред, наряду с величиной допустимой погрешности измерений, простотой и доступностью применения выбранного метода, предъявляют и специальные требования. Это прежде всего нежелательность воздействий, вносящих возмущение в структуру потока и инициирующих фазовые превращения.

Отмечается, что структура газожидкостного течения в значительной степени зависит от ориентации канала и направления движения фаз. В частности, имеется большое различие между характеристиками восходящего и опускного течения в вертикальной трубе. В пузырьковом течении одним из основных факторов, определяющих распределение фаз по сечению трубы, является боковая сила, действующая на всплывающий относительно жидкости пузырь газа. Знак этой силы противоположен для восходящего и опускного течения. Это приводит к различному характеру распределения газовой фазы по сечению трубы. Для восходящего пузырькового потока в вертикальной трубе характерны профили газосодержания с пиками у стенки. Введение в поток газовой фазы может существенно изменить как осредненные, так и пульсационные характеристики течения. Иная картина наблюдается для опускного пузырькового течения, где обычно имеет место ситуация с концентрацией пузырей в центре канала. Это вызывает значительные различия в структуре потока вблизи стенки. Большинство экспериментальных работ

посвящено изучению восходящего течения, тогда как опускное течение исследовано значительно слабее. В литературе известны только несколько статей, исследующих эту проблему. Наиболее детальные из них выполнены в МВТУ им. Н.Э.Баумана под руководством Б.Г. Ганчева.

Последнее и большинство последующих исследований опускного потока, известных из литературы, было проведено в условиях развитого турбулентного режима течения. В этом случае турбулентность двухфазной смеси являлась композицией собственной турбулентности жидкости и псевдотурбулентности, вызванной перемешиванием жидкости пузырями. Используемые теоретические методы, основанные на модели Сато, Секогучи позволяют лишь приближенно учесть влияние газовой фазы на генерацию турбулентности и дают удовлетворительные результаты только в развитых турбулентных потоках. Чтобы отделить влияние перемешивания жидкости пузырями от собственной турбулентности жидкости требуются эксперименты при ламинарных режимах течения.

Газожидкостное снарядное течение в трубах существует в широком диапазоне расходных скоростей жидкости и газа. Констатируется, что отличительной особенностью снарядного режима является наличие в потоке газовых снарядов, часто называемых пузырями Тейлора. Газовый снаряд занимает почти все поперечное сечение трубы. Снарядный режим течения характеризуется квазипериодическим чередованием газовых снарядов и жидких пробок. В вертикальных трубах газовые снаряды имеют скругленную носовую часть, тогда как кормовая зона практически плоская. Они разделяются жидкими пробками, газовая фаза в которых существует в виде пузырей. Структура течения в жидкой пробке существенно отличается как от однофазного течения в трубе, так и от двухфазного пузырькового течения. Жидкость, обтекающая газовый снаряд, движется в виде падающей пленки. При этом направление трения на стенке может не совпадать с направлением основного потока. Для двухфазных газожидкостных потоков характерно образование крупномасштабных структур, обусловленных взаимодействием

фаз. В случае снарядного течения такие структуры, как газовые снаряды и разделяющие их жидкие пробки, наиболее четко выделены. Исследованию снарядного режима течения посвящено большое количество работ. Следует отметить, что большинство исследований было посвящено изучению характеристик газовой фазы (длины и скорости снарядов, частоты их прохождения). В то же время значительный интерес представляют характеристики жидкой фазы. В работах по изучению снарядного потока практически не исследована пристенная зона течения.

В литературе широко и подробно представлены экспериментальные исследования восходящего газожидкостного течения в вертикальных трубах и каналах. Большая часть экспериментальных исследований пузырьковых потоков посвящена течениям в вертикальных трубах. В этом случае распределение газовой фазы формируется с помощью боковых сил, действующих на всплывающие пузыри при наличии градиента скорости.

Намного меньше внимания было уделено пузырьковым газожидкостным потокам в горизонтальных и наклонных каналах, хотя именно в этом случае ориентация канала может быть очень важна.

В двухфазных пузырьковых течениях имеется ряд проблем, по которым в настоящее время нет удовлетворительных теоретических подходов. Это касается, в частности, задачи распределения газовой фазы по сечению канала, а также влияния дисперсной фазы на турбулентность несущей фазы. В отличие от однофазного течения, на гидродинамические характеристики газожидкостного течения существенно влияют ориентация канала и направление течения. Многообразие режимов течения существенно усложняет теоретическое предсказание гидродинамики двухфазного потока, требуя использования многочисленных гипотез, предположений и приближений. Сложность структуры течения делает невозможным чисто теоретическое описание его поведения и требует использования эмпирических данных. Поэтому экспериментальное изучение газожидкостных потоков является актуальным.

Проблема надежного проектирования оборудования ставит задачу

создания методов расчета газожидкостных потоков, имеющих высокую точность и достоверность. На основании обзора автором были поставлены и решены следующие основные задачи:

- разработка и модификация методики измерений локальных гидродинамических характеристик газожидкостных течений на основе электродиффузионного метода; - адаптация метода для измерений в пристенной зоне течений;
- экспериментальное исследование гидродинамической структуры опускающего газожидкостного пузырькового потока в турбулентном режиме течения в широком диапазоне режимных параметров. В т.ч. средних и пульсационных характеристик течения, детальное исследование пристенной зоны течения, изучение влияния малых добавок газа на течение жидкости;
- экспериментальное исследование опускающего пузырькового течения в «псевдоламинарном» режиме при докритических числах Рейнольдса жидкости;
- экспериментальное исследование восходящего снарядного течения в трубе. В т.ч. измерение профилей скорости жидкости в жидких пробках с использованием методики условного осреднения, исследование изменения скорости по длине жидкой пробки, измерение эволюции трения на стенке в пленке жидкости вокруг газового снаряда по мере движения снаряда;
- разработка методики измерения характеристик дисперсности газовой фазы на основе скоростной видеосъемки, алгоритмов вычисления размеров газовых включений по анализу изображений;
- разработка методики измерений локальной теплоотдачи к потоку в режиме постоянного теплового потока, оценка погрешности измерений;
- экспериментальное исследование гидродинамики и теплоотдачи от стенки в пузырьковом течении в наклонном прямоугольном плоском канале с переменным углом наклона, трения на стенке и коэффициента теплообмена при различных углах наклона и различных расходах фаз.

Во второй главе рассмотрены основные методы и методики измерений.

Дается описание электрохимического метода исследования гидродинамических характеристик двухфазных потоков, основанного на измерении скорости диффузии активных ионов к поверхности электрода-датчика. Приводятся преимущества данного метода перед традиционными методами исследований и его ограничения. Описана методика измерения измерений локальных характеристик потоков при помощи датчика «лобовая точка», способного работать в диапазоне частот 500-1000 Гц. Данный датчик позволил совместить в одном устройстве два метода измерения- электродиффузионный и электропроводности, что позволило одним датчиком получать локальные данные о скорости жидкости и газосодержании. Комбинация 2-х таких датчиков позволила автору измерять скорость движения газовых включений в потоке.

Описана методика измерения теплообмена газожидкостного потока с обогреваемой стенкой. Оцениваются погрешности используемого метода.

Детально описана методика измерения диаметра газовых пузырей с помощью теневой фотографии при встречном освещении газожидкостного потока параллельным пучком света от светодиодной матрицы.

В третьей главе описываются результаты исследований турбулентных опускных газожидкостных течений в широком диапазоне чисел Рейнольдса и газосодержаний потока.

Приводятся обширные экспериментальные данные по:

- локальному газосодержанию и его распределению по сечению канала,
- скорости жидкой фазы и его распределению по сечению канала,
- пульсационным характеристикам трения и скорости жидкости и их распределению по сечению канала.

Полученные автором результаты сравниваются с имеющимися экспериментальными данными других авторов и результатами моделирования по известным теоретическим моделям.

В четвертой главе описываются результаты исследований опускных газожидкостных течений для докритических чисел Рейнольдса. Использование

водо- глицериновых рабочих жидкостей позволило провести исследования в ламинарной области течения.

Приводятся обширные экспериментальные данные по:

- локальному газосодержанию и его распределению по сечению канала,
- скорости жидкой фазы и его распределению по сечению канала,
- пульсационным характеристикам трения и скорости жидкости и их распределению по сечению канала.

Полученные автором результаты сравниваются с имеющимися экспериментальными данными других авторов и результатами моделирования по известным теоретическим моделям.

В пятой главе приведены обширные экспериментальные данные по исследованию восходящего снарядного течения в вертикальной трубе.

Выполнено детальное исследование распределений скорости жидкости в поперечном сечении и вдоль жидкой пробки, разделяющей газы снаряды, трение в пленке жидкости, обтекающей снаряд. Показано существенное отличие в распределениях скорости в снарядном и пузырьковом восходящих потоках.

В шестой главе приведены экспериментальные данные по исследованию гидродинамики и теплообмена восходящего пузырькового течения в наклонном плоском канале. Результаты исследования трения и теплоотдачи для турбулентной области чисел Рейнольдса показывают наличие максимумов при углах наклона 20-40 гр.

В заключении формулируются основные результаты, полученные в диссертации.

Значимость результатов работы для науки и практики продемонстрирована как в диссертации, так и автореферате.

Дальнейшее внедрение или использование результатов диссертационной работы В.В. Рандина может быть рекомендовано в следующих организациях и учреждениях: ИТ СО РАН, ИТПМ СО РАН, ИГиЛ СО РАН, ИНГГ СО РАН,

ИСЭМ СО РАН, ИФ СО РАН, ИТ УрО РАН, НГУ, МГУ, МГТУ, НГТУ, МЭИ, СПбГПУ, УрФУ и др.

Диссертационная работа В.В. Рандина соответствует требованиям установленным Положениям ВАК о порядке присуждения ученых степеней.

Результаты диссертационного исследования достаточно полно опубликованы в открытой печати. Основные положения диссертации полностью отражены в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях (46 публикаций), внесенных в Перечень журналов и изданий, утвержденных Высшей аттестационной комиссией.

Работы В.В. Рандина хорошо апробированы на всероссийских и международных конференциях.

Таким образом, диссертационная работа В.В. Рандина актуальна, содержит новые научные результаты, имеет значимость для науки и представляет практическую ценность.

По диссертационной работе имеются ряд замечаний.

1. В разделе «Введение» имеются повторы, имеющие иногда дословный характер.
2. В работе много говорится о достоинствах термодиффузионного метода, как средства для исследования пузырьковых, снарядных и пленочных течений, но в то же время слабо отражены его недостатки и ограничение применимости электродиффузионного метода при изменяющихся свойствах исследуемых сред.
3. Зонд типа «лобовая точка» располагается в потоке и может вносить заметные возмущения в исследуемое течение. Производилась ли автором оценка этого эффекта.
4. При измерении характеристик пленки жидкости, обтекающей газовый снаряд не сказано производилась ли и, каким образом производилась тарировка датчиков.
5. Метод измерения характеристик пузырькового течения с применением водо- глицериновых смесей действительно позволяет провести

исследования в докритической области течения. Однако не ясно, как можно перенести полученные результаты на реальные рабочие жидкости.

6. Такой же вопрос возникает при использовании в экспериментах ферри и ферроцианидных растворов.

7. Требуется пояснить, как полученные результаты могут быть использованы для объектов энергетики, где скорости потоков и плотностей теплового потока более, чем на порядок выше исследованных автором.

8. В тексте диссертации имеется ряд мелких неточностей. Например, на стр.77, 78, 86 отсутствуют обозначения линий на графике (рис. 3.6, 3.7, 3.15).

Указанные замечания не снижают высокий экспериментальный и теоретический уровень и практическую значимость представленной диссертации.

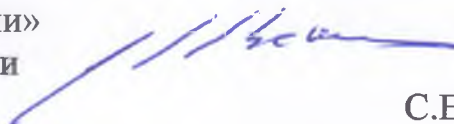
Заключение

Диссертация Рандина Вячеслава Валерьевича «Гидродинамическая структура и теплообмен двухфазных газожидкостных потоков», представленная защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, является законченной самостоятельной научно-исследовательской работой. Совокупность полученных В.В. Рандиным результатов можно квалифицировать как значительный вклад в развитие экспериментальной механики жидкостей и газов, теплофизики и создание новых диагностических и расчетных методов для пузырьковых и снаряженных двухфазных систем.

По своей актуальности, объёму выполненных исследований, научной новизне и практической значимости полученных результатов диссертационная работа В.В. Рандина соответствует требованиям п.7 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 30.01.2002 года № 74 (с изменениями, внесенными Постановлением Правительства Российской Федерации от 20.06.2011 года № 475), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой

степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения степени доктора технических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:
заведующий кафедрой «Атомных станций
и возобновляемых источников энергии»
УрФУ, заслуженный энергетик России
д.т.н., профессор



С.Е. Щеклеин

Щеклеин Сергей Евгеньевич доктор технических наук,
специальность 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника,
заведующий кафедрой «Атомных станций и возобновляемых источников
энергии» Федерального автономного государственного образовательного
учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н.Ельцина»
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
Телефон 8-343-375-95-08 E-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

ПОДПИСЬ
ЗАВЕРЯЮ.

Щеклеин С.Е.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ УРФУ
ОЗЕРЕВ Н.Н.

