

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу

Воробьева Максима Александровича

«Влияние дисперсной фазы на локальную структуру и теплообмен пузырьковых течений в области малых газосодержаний»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность темы исследования

Использование двухфазных газожидкостных течений, в частности пузырьковых, играет значительную роль в ряде современных активно развивающихся отраслей промышленности: химической, атомной, нефтегазовой, металлургической, пищевой и др. Создание микропузырей является важной областью исследований для различных медицинских приложений. В связи с этим требуется постоянное улучшение методик расчета газожидкостных потоков, которые могли бы послужить основой для проектирования и безопасной эксплуатации технических устройств.

Для создания и развития современных методик расчета пузырьковых течений необходимы обширные экспериментальные данные о локальной структуре и интегральных характеристиках (теплоотдаче и гидравлическом сопротивлении) потоков и влиянии на них дисперсности газовой фазы. В частности в каналах сложной формы, например, в каналах имитирующих тепловыделяющие сборки ядерных реакторов (ТВС). Вышесказанное в достаточной мере определяет актуальность представленной диссертационной работы.

Научная новизна

Из полученных в диссертационной работе результатов необходимо отметить как основные, обладающие научной новизной, следующие:

- экспериментально показано влияние на размеры пузырей при отрыве расположения и ориентации подводящего капилляра в канале, а также диаметра капилляра и вязкости жидкости при расходах газа ниже критического значения;
- экспериментальные данные о локальной гидравлической структуре опускного пузырькового течения вблизи режима зависания газовой фазы и при докритических числах Рейнольдса жидкой фазы. Установлено значительное влияние газовой фазы на локальную структуру потока даже при малых газосодержаниях;

- показано, что для восходящего пузырькового течения в сборке стержней вклад газовой фазы в интенсификацию теплообмена возрастает при уменьшении числа Рейнольдса и удалении от дистанционирующей решетки. Обнаружено влияние структуры распределения газовой фазы по сечению канала на напряжение трения и интенсивность турбулентных пульсаций в пристенной зоне стержней сборки;

- определено, что значения напряжения трения и пульсаций напряжения трения существенно зависят от расстояния до дистанционирующей решетки. Показано, что наличие дистанционирующих решеток приводит к перестроению профиля газосодержания от «колоколообразного» к «седлообразному».

Достоверность и обоснованность результатов и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечивается использованием современных отработанных методик исследований и аттестованных средств измерений, проведением калибровочных экспериментов и оценкой величин погрешностей измерений, повторяемостью и согласованием полученных результатов с надежными данными других исследователей.

Научная и практическая значимость

Полученные в работе экспериментальные данные по режимам генерации газовых пузырей в потоке жидкости имеют важное научное и практическое значение. Они могут быть полезны для оптимизации работы технических устройств, таких как абсорбционные насосы и биореакторы пузырькового типа, поскольку размер и дисперсность газовых включений оказывает существенное влияние на процессы массообмена.

Экспериментальные данные о параметрах опускных пузырьковых потоков при докритических числах Рейнольдса и вблизи режима зависания газовой фазы могут использоваться для верификации и модификации расчетных моделей таких течений.

Кроме того, экспериментальные данные о локальных характеристиках пузырьковых течений в вертикальной сборке стержней позволят лучше понять механизмы влияния газовой фазы на теплогидравлические параметры течения. Такие данные могут быть полезны при проверке расчетных защитных кодов атомных электростанций.

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы (246 наименований). Работа изложена на 138 страницах машинописного текста, содержит 84 рисунка и 4 таблицы.

Во введении автором представлена краткая характеристика работы, обоснована её актуальность. Сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, а также выносимые на защиту положения. Указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе приведен обзор работ по теме диссертации. Рассмотрено влияние дисперсности газовой фазы и расходных параметров фаз на интегральные (коэффициент теплоотдачи и напряжение трения на стенке канала) и локальные характеристики потока. Обсуждены способы введения газовой фазы в поток для создания газожидкостной смеси. Из которых для использования в работе выбран способ вдувания через отверстие на стенке канала или капилляр, позволяющий варьировать в широких пределах расходное объемное газосодержание (β) и размер пузырей, а также получать монодисперсные пузырьковые потоки. Представлены модели и соотношения для отрывных диаметров пузырей, выдуваемых из капилляров и отверстий в неподвижную и движущуюся жидкость. Рассмотрены особенности спутных опускных пузырьковых течений по сравнению с восходящими потоками. Сделан вывод о фрагментарности имеющихся данных о характеристиках спутных опускных течений при малых расходах фаз, особенно вблизи режима зависания газовой фазы, а также о влиянии расположения инжектора (капилляра) газа в потоке на отрыв пузырька. Обсуждены работы, посвященные исследованию пузырьковых течений в каналах, имитирующих ТВС. Отмечен недостаток экспериментальных данных о структуре течения в пристенной зоне стержней и о влиянии дистанционирующих решеток на характеристики двухфазного потока в сборке.

Во второй главе представлены экспериментальные методики, используемые в работе. Описан способ определения дисперсности газовой фазы с помощью обработки теневых изображений течения, полученных в результате скоростной видеосъемки. Рассмотрен электродиффузионный метод, применяемый в работе для измерения локального газосодержания, скорости жидкости и напряжения трения на стенке канала. Описана методика получения экспериментальных данных о теплообмене в газожидкостном потоке в канале, имитирующем ТВС, с помощью резистивных датчиков температуры при обогреваемой электрическим током стенке стержня. Приведены погрешности измерения основных параметров.

В третьей главе приведены результаты исследования процесса формирования дисперсной газовой фазы, выдуваемой из капилляра в поток жидкости. В разделе 3.1 описаны экспериментальная установка, каналы и капилляры, используемые в работе. Раздел 3.2 посвящен исследованию влияния расходных параметров жидкости (воды) и газа (воздуха), направления течения и положения капилляра, на размер пузырей при

отрыве в потоке жидкости. Использовались три вида расположения отверстия капилляра: заподлицо с одной из стенок канала, в центре канала, и в центре канала с направлением по потоку жидкости. При прочих равных условиях пузыри самых мелких размеров формировались на капилляре в центре канала поперек потока, а самых крупных на капилляре в центре канала с направлением по потоку. При малых скоростях жидкости отрывные размеры пузырей были выше в опускном режиме течения по сравнению с восходящим, что объясняется противоположной направленностью векторов скорости жидкости и силы Архимеда. При высоких скоростях жидкости (выше относительной скорости всплытия пузырей) влияние направления потока становилось незначительным. В разделе 3.3 описано исследование влияния физических свойств жидкости и диаметра капилляра на отрыв пузыря. Использовалось опускное течение глицерина с температурой 70, 80 и 90°C в качестве рабочей жидкости для возможности варьирования физических свойств. Капилляр располагался в центре потока с осью отверстия перпендикулярно его направлению. Показано, что при расходе газа не превышающем критического (при котором происходит переход от отрыва одиночного пузыря к отрыву с коалесценцией вблизи капилляра) диаметр капилляра и свойства жидкости оказывают существенное влияние на характер зависимости среднего объема пузыря от расходов фаз. При расходе газа больше критического это влияние практически не прослеживается. Раздел 3.4 посвящен исследованию различных режимов отрыва пузыря от капилляра в поток жидкости. Показано, что при больших расходах газа итоговый размер пузырей определяется процессом коалесценции. Определены наиболее пригодные режимы отрыва для создания монодисперсных газожидкостных смесей.

В четвертой главе представлены результаты исследования опускного пузырькового течения при докритических числах Рейнольдса по жидкой фазе (Re_L) (раздел 4.3) и в режиме зависания газовой фазы (раздел 4.2). В разделе 4.1 описываются экспериментальная установка и измерительные участки. Вблизи режима зависания газовой фазы показано, что напряжение трения на стенке канала больше чем в однофазном потоке. Интенсивность турбулентных пульсаций в пристенной зоне канала уменьшалась при увеличении расходного газосодержания. Исходя из баланса сил, были рассчитаны значения истинного объемного газосодержания с помощью измеренных величин перепада давления на измерительном участке и напряжения трения на стенке. Показана плохая сопоставимость корреляций, основанных на модели потока дрейфа газовой фазы, с полученными экспериментальными данными. При докритических Re_L даже малая добавка газовой фазы приводила к существенной деформации профилей скорости. Максимум скорости имел место при промежуточном значении радиуса и был

более выражен при больших значениях β , в то время как в центральной части трубы значения скорости жидкости были примерно одинаковы.

В пятой главе представлены результаты исследования характеристик восходящего пузырькового течения в канале, представляющем собой сборку из 9-ти стержней квадратной компоновки. Подвод теплоты осуществлялся с помощью пропускания электрического тока через стенку центрального стержня сборки. Коэффициент теплоотдачи и напряжение трения на стенке также измерялись на центральном стержне, а локальное газосодержание измерялось в сечениях канала вокруг него. В области низких чисел Рейнольдса в сечениях вдали от дистанционирующей решетки (больше 15–20-ти калибров канала) было отмечено сильное влияние газовой фазы на интенсификацию теплоотдачи, что существеннее проявлялось с увеличением газосодержания. Вблизи дистанционирующей решетки ее влияние на интенсификацию теплообмена являлось подавляющим по сравнению с влиянием дисперсной фазы. В области дистанционирующей решетки профиль газосодержания имел «куполообразную» форму, а при удалении от нее происходило перестроение профиля к «седлообразному» виду. При этом максимумы распределения становились более выраженными при увеличении Re_L и уменьшении газосодержания. При обработке сигналов датчика трения были получены спектры турбулентных пульсаций, которые затухают по закону близкому к Колмогоровскому ($-5/3$), но на удалении от решетки (в зоне соответствующей «седлообразному» профилю газосодержания) в пузырьковом режиме практически весь спектр описывался законом (-1).

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Апробация работы

По теме диссертации имеется достаточное количество публикаций – 36 работ, из них 12 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в перечень, рекомендованных ВАК РФ. Результаты исследований, изложенных в диссертации, были представлены на 25-ти международных и всероссийских конференциях.

Основные замечания по работе

1. Методики получения экспериментальных данных о напряжении трения на стенке канала и локальном газосодержании подразумевали использование в качестве рабочей

жидкости специального электролита. Отсюда возникает вопрос о переносимости полученных результатов на теплоносители, используемые в реальных установках, например, воду.

2. Значение напряжения трения на стенке канала определялось из первичных измеряемых параметров с помощью формулы Дарси-Вейсбаха, в которой коэффициент гидравлического сопротивления λ рассчитывался по известным формулам для гладкой трубы. Однако при неламинарном режиме течения λ может существенно зависеть от относительной шероховатости стенки трубы.

3. Раздел 2.4 диссертации, посвящен оценке погрешностей (по новому ГОСТу 34100.3-2017 «неопределенностей») измерений. В нем вместо подробных данных касемо основных определяемых электродиффузионным методом величин (напряжения трения на стенке канала, скорости жидкой фазы и локального газосодержания), учитывающих специфику исследования, представлены ссылки на неопределенности измерений этих величин в других работах.

4. В диссертации не представлено количественных данных о таком важном параметре, наряду с диаметром отрыва пузырей от капилляра, как частота их отрыва.

5. Работа имеет ряд текстовых недоработок и ошибок. Например, большое количество раз союзы «также» и «чтобы» написаны отдельно («так же» и «что бы» соответственно). Диссертация написана на русском языке, однако таблица 1.1 и надписи на рисунках 1.2, 1.5–1.9, 1.11, 3.14, 3.17 оформлены на английском языке.

Общее заключение о работе

Сделанные замечания не снижают общую положительную оценку работы. Содержание автореферата и сформулированные в нем выводы полностью соответствуют представленным в диссертации результатам исследований. Считаю, что диссертация Воробьева Максима Александровича представляет собой завершенную научно-квалификационную работу на актуальную тему, обладает научной новизной и практической значимостью, соответствует требованиям пп. 9-4 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (ред. от 01.10.2018, с изм. от 26.05.2020), а её автор Воробьев Максим Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Я, Васильев Николай Викторович, даю свое согласие на включение своих персональных документов в документы, связанные с защитой диссертации Воробьева Максима Александровича «Влияние дисперсной фазы на локальную структуру и теплообмен пузырьковых течений в области малых газосодержаний», и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

кандидат технических наук (1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника),
ФГБУН «Объединенный институт высоких температур РАН» (ОИВТ РАН), старший
научный сотрудник лаборатории теплообмена в энергетических установках (№ 10.2)

Васильев Николай Викторович

17.05.2023 г.

Адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2., ОИВТ РАН.

Телефон: +7 (495) 485-04-21

E-mail: nikvikvas@mail.ru

Подпись Васильева Николая Викторовича заверяю

Заместитель директора ОИВТ РАН, д.ф.-м.н.



Гавриков Андрей Владимирович