

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора Института механики
им. Р.Р. Мавлютова –
обособленного структурного
подразделения Федерального
государственного бюджетного
научного учреждения Уфимского
федерального исследовательского
центра Российской академии наук,
кандидат физико-математических
наук, доцент

Галимзянов М.Н.

« 25 » мая 2023



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Воробьева Максима Александровича
«Влияние дисперсной фазы на локальную структуру и
теплообмен пузырьковых течений в области малых
газосодержаний», представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14
Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность темы диссертации. Невозможно переоценить значение исследований газожидкостных течений для большинства современных технологий добычи, транспортировки и переработки углеводородного сырья, для энергетики, в том числе атомной и других отраслей промышленности. Основные цели, которые при этом преследуются связаны с прогнозированием поведения двухфазных потоков в условиях теплообмена, переменного вектора ускорения силы тяжести относительно направления и скорости течения, распределением дисперсной фазы и оценкой сил сопротивления потоку. В этих исследованиях особое место уделяется течениям жидкостей с пузырьками газа, причём при изучении процессов в вертикальных трубах, большинство работ посвящено восходящим течениям. Важнейшие результаты были получены в классических публикациях В.Е. Накорякова, А.П. Бурдукова, А.Н. Кашинского и их коллег. Большой вклад в развитие экспериментальных исследований по пузырьковым течениям внесли N. Zuber, M. Ishii, A. Serizawa, T. Hibiki, K. Sekoguchi, Y. Sato и другие. В работе Леви (S. Levy, 1963), по-видимому, впервые была предложена формула для оценки касательных напряжений в пузырьковом потоке, которая в дальнейшем была модифицирована и приведена к современному виду в работах Кларка и его соавторов (N.N. Clark et al, 1984 – 1990). Среди множества выполненных исследований результаты по нисходящим или опускным течениям занимают более скромное место. Наибольший охват решённых задач по опускным

течениям представлен в работах А.Н. Кашинского и В.В. Рандина. При этом проблемы, связанные с особенностями нисходящих потоков в режиме зависания газовой фазы, распределением гидродинамических параметров в модели вертикальной сборки, условиями, влияющими на размеры формирующихся пузырьков, а также ряд других вопросов оставались за пределами внимания исследователей. Необходимость решения указанных задач как с научной точки зрения, так и для практических приложений, свидетельствует об актуальности диссертационной работы М.А. Воробьева.

Оценка содержания диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации из перечня ВАК и списка цитированной литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 138 страниц. Работа содержит 84 рисунка и четыре таблицы. Список литературы содержит 245 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность выполненной научной работы, сформулированы цель и задачи исследований, дано описание научной новизны полученных результатов, обоснована их достоверность, теоретическая и практическая значимость. Приведён перечень из двадцати пяти конференций и семинаров, на которых докладывались и обсуждались результаты исследований. Перечислены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации обсуждается современное состояние вопроса о двухфазных течениях и даётся классификация их возможных режимов. На основе известных научных публикаций приведен обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных различным аспектам исследования пузырьковых течений. Отмечены недостатки при использовании двумерных карт режимов течения двухфазных потоков и целесообразность классификации режимов с помощью нейронных сетей. Рассмотрены вопросы определения истинного газосодержания в трубах и распределения газовой фазы по сечению канала. Описаны особенности гидродинамики пузырьковых течений с учётом напряжения трения на стенках канала и теплообмена. Показана роль дисперсности газовой фазы на параметры течения, способы генерации пузырьков, их формирования и модели отрыва от капилляра. Достаточно подробно изложены результаты исследования особенностей опускных пузырьковых течений, в том числе при докритических числах Рейнольдса и вблизи режима зависания газовой фазы. Приведены, также, результаты ряда работ по исследованию пузырьковых течений в сборках атомных реакторов, включая влияние дистанцирующих решёток на измеряемые параметры.

Вторая глава диссертации посвящена описанию экспериментальных методик. Последовательно изложены метод теневых изображений и электродиффузионный

метод для исследования пузырьковых течений, методы измерения трения на стенке канала, а также скорости жидкости, локального газосодержания и теплообмена. Важно и то, что автор уделил внимание анализу погрешностей проводимых измерений.

В третьей главе представлены экспериментальные данные по отрыву пузырька от капилляра. Следует отметить, что несмотря на вспомогательный характер исследований в данной главе получены интересные и важные результаты, носящие не только методический характер. Например, приведены зависимости отрывного диаметра пузырьков от расходов фаз как в восходящем, так и в нисходящем потоках. Установлено влияние способа ввода газа в поток, а также направления этого потока на размер пузырьков. Изучено влияние расхода газа, скорости жидкости и температуры на диаметр пузырьков. Важный результат в виде карты режимов отрыва пузырька представлен на рисунке 3.28. Фотографии режимов отрыва на рисунках 3.22 – 3.27 можно непосредственно использовать в качестве учебного материала.

Четвёртая глава посвящена экспериментальному исследованию гидродинамических характеристик опускных пузырьковых течений. Приведено подробное описание экспериментальной установки и условий проведения экспериментов, особенно вблизи режима зависания газовой фазы. На основе данных измерений были построены относительные величины касательных напряжений и их пульсаций на стенке в зависимости от расходного газосодержания при различных значениях числа Рейнольдса. Выполнено сравнение экспериментальных данных истинного газосодержания с корреляционными зависимостями параметров модели «drift-flux», полученными различными авторами. Показано, что наиболее подходящие корреляции построены в работе С. Dong'а и Т. Hibiki (2021). Безусловно интересными результатами представляются профили локального газосодержания, относительных скоростей и их пульсаций по сечению канала при различных гидродинамических параметрах.

В пятой главе проведено исследование структуры пузырькового течения в сборке стержней экспериментальной установки. В этой главе значительное внимание уделено влиянию теплообмена, для чего были построены величины относительного числа Нуссельта в зависимости от чисел Рейнольдса при различных газосодержаниях с учётом расстояния до дистанцирующей решётки. Построены эпюры распределения локального газосодержания, а также распределения напряжений трения и их пульсаций при различных гидродинамических параметрах.

Научная новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. При анализе научной новизны важно подчеркнуть, что исследования в диссертационной работе М.А. Воробьева проведены на оригинальных экспериментальных установках, а измерения проведены в соответствии с методиками самого автора. В каждой главе содержится достаточно большое количество новых результатов, значительная часть которых опубликована в научной литературе, о чём автор даёт соответствующие ссылки в тексте.

Отметим некоторые новые результаты и выводы:

- по третьей главе:

экспериментально доказано, что при достаточно больших расходах газа окончательный размер пузырьков определяется их коалесценцией;

установлены режимы, наиболее соответствующие созданию монодисперсных пузырьковых течений;

- по четвёртой главе:

относительные пульсации касательных напряжений при $Re=2900$ качественно отличаются от их значений при других рассмотренных автором режимах;

при значении числа Рейнольдса $Re = 1500$ и расходном газосодержании $\beta = 0.1$ обнаружено аномальное поведение профиля пульсаций скорости;

установлено, что введение газовой фазы даже при малых значениях расходного газосодержания приводит существенным изменениям касательных напряжений по сечению канала;

- по пятой главе:

установлено, что вклад газовой фазы в интенсификацию теплообмена возрастает при уменьшении числа Рейнольдса и удалении от дистанцирующей решётки;

зависимости напряжений трения и их пульсации от расстояния до дистанцирующей решётки при пузырьковом режиме течения имеют немонотонный вид;

значения напряжений и их пульсаций при наличии газовой фазы заметно превосходят эти значения при однофазном течении.

Научная и практическая значимость полученных результатов. Результаты диссертационной работы М.А. Воробьева в целом представляют собой существенный вклад в теплофизику многофазных сред. Полученные автором результаты могут служить основой для создания новых методов расчёта пузырьковых систем. Научная значимость проделанной работы подтверждается

достаточно весомым списком публикаций и многочисленными выступлениями на международных и российских научных конференциях. Практическая значимость полученных результатов состоит в их востребованности при проектировании и эксплуатации трубопроводных систем различного назначения от энергетики до нефтяной промышленности. Немаловажную роль они могут играть и в экспертной оценке последствий техногенных аварий.

Полученные результаты могут быть использованы научными организациями, занимающимися проблемами многофазных течений: Институт механики МГУ (Москва), Московский энергетический институт (НИУ МЭИ), Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск), Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск), Институт механики и машиностроения Казанского федерального исследовательского центра РАН (г. Казань), Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского федерального исследовательского центра РАН (г. Уфа), проектными организациями, такими, как АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», «Газпромнефть НТЦ», ООО «НИИ Транснефть», ООО «РН-БашНИПИнефть» и др.

Обоснованность и достоверность полученных в работе результатов основана на применении отработанных и протестированных методов измерений и тщательном анализе погрешностей этих измерений. В диссертационной работе приведены результаты тестовых сопоставлений, полученных данных с экспериментальными данными и расчётами других авторов, известными из научной периодики. Достоверность результатов подтверждается и публикациями автора в рецензируемых журналах с высоким научным рейтингом.

Замечания и пожелания по диссертации:

1. На с.85 записано следующее предложение: «Для $Re = 2900$ в случае, когда течение наиболее близко к режиму зависания газовой фазы, наблюдается нетипичное для опускного пузырькового течения поведение пульсаций напряжения трения на стенке канала – его значение больше, чем в однофазном потоке примерно на 20 %». Однако, судя по рисунку 4.5 вблизи области зависания газовой фазы ($\beta \rightarrow 0$) соответствующая точка лежит в окрестности линии пульсаций однофазного потока. По-видимому, слова «когда течение наиболее близко к режиму зависания газовой фазы» являются лишними, так как при $Re = 2900$ все точки нетипичные, кроме той, что лежит вблизи этой области!

2. При сравнении экспериментальных данных с корреляциями Донга и Хибики (Dong and Hibiki, 2021) автор справедливо отметил, что их формулы хорошо описывают экспериментальные результаты в области достаточно высоких расходных газосодержаний. Однако следует обратить внимание на то, что и в

области низких расходных газосодержаний большие отклонения наблюдаются лишь при числах Рейнольдса $Re = 3350, 4450$ (рисунок 4.9в). Примечательный факт! Это обстоятельство даёт возможность в дальнейшем внести поправки к корреляциям, предложенным упомянутыми авторами.

3. Для расчёта касательных напряжений автор диссертации использует соотношение (4.6) со ссылкой на работу Сато и др. (Sato Y. et al, 1981). Однако эти авторы в своей работе выражение для касательных напряжений используют в ином виде. Соотношение, записанное в том виде, как в формуле (4.6), основанное на балансе сил, впервые появилось в работе S. Levy (1963) и в дальнейшем было приведено к современному виду в работах Кларка и его коллег (N. Clark et al, 1985-1990). Кроме того, в первоисточниках перед вторым слагаемым в правой части стоит знак плюс.

4. Важные результаты получены автором при исследовании пульсаций скорости. Так, на Рисунке 4.12в ($Re = 1500, \beta = 0.1$) обнаружено значительное превышение значений пульсаций по сравнению с пульсациями при других значениях числа Рейнольдса и расходного объёмного газосодержания. Очевидно, что данный результат требует физического обоснования и комментария автора!

Приведенные замечания не снижают ценности выполненного исследования и, в основном, носят дискуссионный или рекомендательный характер.

Заключение по диссертационной работе.

Диссертационная работа М.А. Воробьева является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне, обладает внутренним единством и имеет важное научно-практическое значение. Работа соответствует паспорту специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Материалы диссертационной работы докладывались на международных и российских научных конференциях, а также на многочисленных научных семинарах.

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 13 работах, в том числе 12 – в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК РФ.

Автореферат достаточно полно отражает содержание и суть полученных результатов диссертационной работы.

Результаты диссертации могут быть рекомендованы к использованию в научно-исследовательских и проектных организациях, занимающихся исследованиями многофазных течений, созданием новых технологических систем и установок в энергетике, химической и нефтяной промышленности, а также и в

образовательных учреждениях при подготовке специалистов в области теплофизики и гидродинамики многофазных сред.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9-11, 13, 14 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 18.03.2023), а ее автор **Воробьев Максим Александрович** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника**.

Отзыв обсужден и утвержден на научном семинаре Института механики имени Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИМех УФИЦ РАН), протокол № 4 от 25 мая 2023 г.

Я, Урманчеев Саид Федорович, автор отзыва, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Воробьева Максима Александровича и их дальнейшую обработку.

Главный научный сотрудник лаборатории
«Механика многофазных сред» ИМех УФИЦ РАН,
д-р физ.-мат. наук (специальность 01.02.05 –
«Механика жидкости, газа и плазмы»),
профессор

Урманчеев Саид Федорович

«25» мая 2023 г.

Телефон: +7(347) 235-52-55,
e-mail: said52@mail.ru (said@anrb.ru)

Подпись С.Ф. Урманчеева заверяю
ученый секретарь ИМех УФИЦ РАН
канд. физ.-мат. наук

+7(347) 235-52-55
e-mail: us_imech@anrb.ru



Э.Ф. Гайнуллина

Институт механики имени Р.Р. Мавлютова — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИМех УФИЦ РАН). 450054, Россия, г. Уфа, Проспект Октября, 71, (347) 235-52-55, imran@anrb.ru