

УТВЕРЖДАЮ

ИО 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.

« 22 » апреля 2019

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Рандина Вячеслава Валерьевича
«Гидродинамическая структура и теплообмен двухфазных
газожидкостных потоков», представленную на соискание
учёной степени доктора физико-математических наук по
специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Значительное число технологических процессов происходит при различных режимах двухфазных течений, к важнейшим из которых относятся потоки жидкости с пузырьками газа. При этом пузырьковые системы являются универсальным объектом для исследования влияния тепло- и массообмена на закономерности течения. Несмотря на многолетнюю историю их изучения, отражённую в многочисленных научных статьях и монографиях, остаётся множество принципиальных вопросов, решение которых необходимо для создания новых эффективных технологических схем в различных отраслях промышленности с детальным учётом особенностей межфазных взаимодействий. Особое значение эти решения имеют в отраслях промышленности, функционирование которых основано на широком применении трубопроводов и трубопроводных систем: в энергетике, в том числе ядерной, химическом машиностроении, нефтепереработке, при добыче и транспортировке нефти и нефтепродуктов.

Актуальность темы диссертации. Основным внешним фактором, существенно влияющим на характер движения двухфазной среды, очевидно, является расположение оси канала, содержащего газожидкостную смесь, относительно вектора силы тяжести. При этом важная роль для определения особенностей течения пузырьковых систем принадлежит направлению течения смеси. В этой связи в вертикальных каналах рассматривают

восходящие и опускные течения. Основное внимание уделялось восходящим потокам, для которых были определены зависимости трения на стенке трубы, носящие немонотонный и достаточно сложный характер (В.Е. Накоряков, А.П. Бурдуков, А.Н. Кашинский и др.). Интересные модельные представления были развиты в теоретических работах R.T. Lahey и D.A. Drew, а также численных исследованиях их коллег (I.A. Bolotnov et al). Особенности турбулентных пульсаций были рассмотрены в работах Y. Sato, A. Serizawa и др.

В меньшей степени исследования касались опускных течений. Кроме работ автора диссертации и его коллег, следует отметить серию экспериментальных работ M. Ishii, S. Kim и др., расчётно-теоретических – I. Zun, М.Х. Ибрагимова и др.

Многие важные задачи, связанные с установлением закономерностей опускного режима течения пузырьковых систем, до работ автора диссертации оставались неизученными. К таким задачам относятся структура течения в развитом турбулентном течении, механизмы демпфирования турбулентных пульсаций, влияние газовых пузырьков на теплообмен в газожидкостном потоке и целый ряд других задач. Необходимость полученных результатов при проектировании установок и трубопроводных систем, диагностика их состояния, создание базы знаний для реконструкции обстоятельств аварийных ситуаций в промышленности – всё это свидетельствует об **актуальности** темы диссертации Вячеслава Валерьевича Рандина, её своевременности и соответствии паспорту специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Оценка содержания диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации из перечня ВАК и списка цитированной литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 214 страниц. Работа содержит 107 рисунков и одну таблицу. Список литературы содержит 164 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность выполненной научной работы, сформулированы задачи и цель исследований, представлены научные результаты, выносимые на защиту, показана их научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе** приведен обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию гидродинамики пузырьковых газожидкостных течений. Рассмотрены экспериментальные методы их исследования и диагностики. Проведён анализ расчётных моделей пузырьковых потоков, основанный на эмпирической информации об их структуре. Отмечено, также, что большинство моделей использует гипотезу

Сато и Секогучи о наведённой турбулентности при относительном движении пузырьков. Важный вывод, сделанный во введении, касается вопроса о недостаточном объёме информации при описании пристенной области течения, которая в значительной мере и определяет процессы переноса. Итоговый вывод во введении связан с отсутствием систематических исследований опускного пузырькового течения, описанных в научной литературе.

Вторая глава диссертации посвящена методике измерений. Дано описание электрохимического метода исследования гидродинамических параметров газожидкостных потоков, методика измерений теплообмена с помощью термосопротивления, метод теневой фотографии для измерения диаметра газовых пузырьков. Приводятся пределы применимости указанных экспериментальных методов исследования, оценки их погрешностей.

Третья глава работы является наиболее представительной и по объёму выполненных исследований и по количеству новых результатов. В ней приведены результаты исследования структуры опускного турбулентного течения и его гидродинамические характеристики.

В этой главе подробно описана экспериментальная установка и характер её функционирования. Приведены методики проведения и оценки погрешностей измерений.

Были исследованы структура течения, трение на стенке, локальное газосодержание в широком диапазоне измерения параметров. Важно, что особое внимание было уделено структуре течения вблизи стенки и изучению пульсаций скорости жидкости и трения на стенке.

Проведён анализ распределения локального газосодержания и скорости жидкой фазы. Эта часть работы опиралась на модельные представления, связанные с определением поперечной силы, действующей на пузырь (М.Х. Ибрагимов и др., I. Zun, S.P. Antal и др.).

Выполнены исследования опускного газожидкостного течения при малых числах Рейнольдса и при малых расходных газосодержаниях, для чего были созданы экспериментальные установки, соответствующие особенностям проводимых измерений.

Четвёртая глава посвящена опускному пузырьковому течению при докритических числах Рейнольдса. Соответствующие малые значения числа Рейнольдса были достигнуты добавлением глицерина в рабочую жидкость, что повысило её вязкость. Были измерены профили локального газосодержания, профили скорости жидкости, пульсации скорости жидкости и трения на стенке. Выявлен ряд особенностей результатов в рассмотренном диапазоне чисел Рейнольдса при сохранении основных особенностей

опускного режима, выявленных ранее. Установлено, что даже небольшое количество пузырьков в ламинарном потоке вызывает турбулизацию.

В пятой главе проведено исследование структуры восходящего снарядного течения в вертикальной трубе. Автором была предложена методика проведения измерений методом условного осреднения, заключающегося в том, что осреднённые параметры потока определялись отдельно в жидких пробках и в жидких плёнках вокруг газовых снарядов. В главе приведена схема и измерений скорости снарядов и тарировочные кривые сигналов датчиков. Были проведены измерения скорости снарядов. Определена дисперсия их скорости и построены кривые трения на стенке в зависимости от газосодержания.

В шестой главе представлены результаты исследований гидродинамики и теплообмена пузырькового течения в наклонном плоском канале. Специально для этих исследований была создана экспериментальная установка, измерительный блок которой содержал гидродинамический участок и тепловой участок. В этой главе все измерения проводились и в зависимости от угла наклона канала. Измерялись коэффициенты теплообмена, трение на стенке. Построены зависимости теплообмена и трения от числа Рейнольдса и газосодержания. Показано, что трение и теплообмен находятся в приблизительно пропорциональной зависимости. Проведены подробные измерения диаметров пузырей и построены соответствующие гистограммы распределения пузырей по размерам. Приведены экспериментальные данные изменения диаметра пузырей по длине канала в зависимости от угла наклона канала.

Научная новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Прежде всего, следует отметить, что исследования в представленной работе проведены на оригинальных экспериментальных установках, а измерения проведены по авторским методикам. Каждая глава содержит множество новых результатов, большая часть которых опубликована в научной литературе и получила широкую известность.

Отметим некоторые из них:

- по третьей главе:

трение на стенке в опускном режиме течения пузырьковой жидкости выше, чем в однофазном течении при тех же параметрах потока, отмечено хорошее соответствие с расчётами по известной методике (N.N. Clark, R.L.C. Flemmer);

в целом, для опускных течений характерны профили с пиком газосодержания в центральной части канала, а возле стенок – практически

свободные от пузырьков;

в опускном режиме происходит подавление турбулентных пульсаций трения и скорости;

очень важным выводом представляется то, что на распределение скорости по сечению трубы влияет даже незначительное количество газовой фазы. Интересно также и то, что увеличение приведённой скорости жидкости приводит к уменьшению влияния газа на характеристики течения;

- по четвёртой главе:

при малых значениях расходного газосодержания происходит сильное влияние газовой фазы на параметры течения: при докритических числах Рейнольдса возникает турбулизация потока;

- по пятой главе:

установлен факт уменьшения трения по мере удаления от носика снаряда, вплоть до отрицательных значений, что объясняется возникновением возвратных течений в плёнке жидкости под газовым снарядом;

- по шестой главе:

установлено, что в газожидкостном течении угол наклона канала оказывает существенное влияние на трение и теплообмен, причём наибольшие их значения соответствуют углам наклона к горизонту в интервале 20–50°С.

Научная и практическая значимость полученных результатов. Результаты диссертационной работы В.В. Рандина в совокупности представляют собой серьёзный вклад в гидродинамику и теплофизику многофазных сред. Фактически эти результаты – основа нового детального понимания влияния взаимодействия фаз на параметры течения газожидкостных потоков в поле силы тяжести. Их научная значимость подтверждается весомым списком публикаций в самых престижных научных изданиях, многочисленными выступлениями на международных и российских научных конференциях. Очевидной представляется и практическая значимость полученных результатов: прежде всего, они необходимы при проектировании трубопроводных систем и установок широкого спектра назначения – от энергетики до нефтяной промышленности. Важную роль эти результаты могут иметь и при экспертизе последствий техногенных аварий, например, на нефтеперерабатывающих предприятиях.

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) и др., проектными организациями, такими, как АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 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. В диссертации не приведен перечень обозначений, что иногда затрудняет прочтение текста.

2. Давление в канале измерялось двумя манометрами (Рис. 3.1). Делалась ли оценка по распределению давления по длине канала: насколько оно отличалось от линейного распределения в газожидкостном потоке?

3. В диссертации приведено сопоставление результатов эксперимента с данными работы Колина, Фабра и Кампа (C. Colin, J. Fabre, F. Camp, 2012) по измерению профилей газосодержания (Рис. 3.11). Однако в тексте не указана причина примечательного расхождения: наличия максимума газосодержания у указанных авторов и отсутствия этого максимума у автора диссертации.

4. Анализ кривых относительной интенсивности пульсаций скорости жидкости, основанный на рис. 3.27-3.32, привел автора к выводу (с. 99), что различие в поведении пульсаций с ненулевым газосодержанием связано с «...перемешиванием жидкости пузырьками газа, движущимися относительно жидкости с определенной скоростью...». Это логичное заключение! Однако, неоднозначный характер упомянутых кривых требует физического обоснования приведённого утверждения в контексте интерпретации зависимостей от приведенной скорости жидкости V_* , размеров пузырьков и др.

5. При анализе формирования распределения локального газосодержания автор использует выражения для поперечной силы, введенные в работах М.Х. Ибрагимова и др. (1973), I. Zup (1980), а также анализирует работы других авторов. Однако аналитическое выражение для

поперечной силы в сдвиговом потоке было выведено еще Сэффманом (P.G. Saffman, 1965) и было бы естественным упомянуть его работу.

6. На некоторых рисунках отсутствуют значения параметров, которые приходится воспроизводить по тексту, что затрудняет чтение работы. Например, в чем отличие параметров течения на верхних и нижних графиках Рис. 3.40 и Рис. 3.41.

7. Характер изменения пульсаций скорости жидкости на графиках Гл. 3 (Рис. 3.40, 3.41) и Гл. 4 (Рис. 4.5) носит качественно различный характер. Каков физический механизм, обуславливающий эти различия в распределении пульсаций по сечению канала при турбулентных режимах течения и при докритических числах Рейнольдса, несмотря на то, что порядок относительных пульсаций примерно тот же. Какие значения чисел Рейнольдса рассматривались при исследовании турбулентных течений?

8. В выводах по Гл. 6, с. 194, в первом пункте отмечено: «Наибольшие значений трения и теплообмена соответствуют углам наклона канала $\theta \approx 20^\circ \div 50^\circ$ ». Возникает вопрос: это утверждение касается только измерений, представленных в диссертации для одного и того же значения числа Рейнольдса $Re = 12400$ или справедливо для более широкого диапазона изменения чисел Рейнольдса.

9. При исследовании газожидкостных течений при изменении угла наклона канала в Гл. 6 представлены результаты измерений размеров пузырьков в виде гистограмм (Рис. 6.9 – 6.13). Указанные гистограммы носят сложный характер, который связан с влиянием угла наклона. При этом в предыдущих главах информация о характере распределения пузырьков по их размерам не была представлена. Есть ли гарантия, что размеры пузырьков, указанные на рисунках в предыдущих главах находятся в пределах допустимой погрешности?

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

Заключение по диссертационной работе.

Диссертационная работа Рандина Вячеслава Валерьевича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне, обладает внутренним единством и имеет важное научно-практическое значение. Работа соответствует паспорту специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

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

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 46

работах, в том числе 18 – в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК РФ.

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

Результаты диссертации могут быть рекомендованы к использованию в научно-исследовательских, проектных и образовательных учреждениях, занимающихся исследованием многофазных течений, созданием новых технологических систем и установок в энергетике и нефтяной промышленности.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Рандин Вячеслав Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв ведущей организации составил доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Механика многофазных сред» Урманчеев Саид Федорович.

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 № 7 от 22 апреля 2019 г.

Главный научный сотрудник лаборатории
«Механика многофазных сред» ИМех УФИЦ РАН
доктор физико-математических наук
(специальность 01.02.05 – «Механика жидкости,
газа и плазмы»), профессор

«22» апреля 2019 г.

Урманчеев Саид Федорович

450054, Россия, г. Уфа, проспект Октября, 71, Институт механики имени Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИМех УФИЦ РАН)

Телефон: (347) 235-52-55,

e-mail: said52@mail.ru (said@anrb.ru)

Подпись	<u>Урманчеев С.Ф.</u>	30.06.2019
Ученый секретарь ИМех УФИЦ РАН	<u>Раффиков Р.Р.</u>	
« 22 » апреля		20 19 г.