

На правах рукописи



Рандин Вячеслав Валерьевич

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ТЕПЛООБМЕН
ДВУХФАЗНЫХ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Новосибирск 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Вараксин Алексей Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор, чл.-корр. РАН, ОИВТ РАН, заведующий отделением

Мусакаев Наиль Габсалимович, доктор физико-математических наук, доцент, ТюмФ ИТПМ СО РАН, заместитель директора по научной работе

Щеклеин Сергей Евгеньевич, доктор технических наук, Уральский федеральный университет им. Первого президента России Б.Н. Ельцина, кафедра атомные станции и возобновляемые источники энергии, заведующий

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, г. Уфа

Защита состоится «15» мая 2019 г. в 9 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 003.053.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, <http://www.itp.nsc.ru/dissertation/randin-vyacheslav-valerevich>

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 003.053.01 по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1 (факс: (383) 330-84-80, e-mail: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан "14" марта 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

д.ф.-м.н., профессор  Владимир Васильевич Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Газожидкостные течения встречаются в целом ряде промышленных установок в химической и микробиологической промышленности, в энергетике, а также при совместном сборе и транспорте нефти и газа.

Структура газожидкостного течения в значительной степени зависит 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, детально исследующих эту проблему.

Большинство исследований опускного потока, известных в литературе, 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. 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. 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 практиче-

ски 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 течения 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. Нередко 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. Несмотря на большое количество работ, посвященных этому вопросу, в настоящее время не существует надежных методов расчета двухфазных течений. Существующие общепринятые полуэмпирические методы расчета двухфазных потоков являются весьма приближенными и не отражают многообразия процессов в двухфазных потоках. Появившиеся в последнее время новые методы расчета еще далеки от завершенности, поскольку они требуют обширной эмпирической информации о структуре двухфазных течений. В этих условиях решающее значение приобретает экспериментальное исследование локальной структуры газожидкостных потоков в широком диапазоне параметров и при различных режимах течения.

Целью работы является проведение комплексных экспериментальных исследований локальных средних и пульсационных характеристик газожидкостных потоков, получение детальной экспериментальной информации о структуре газожидкостных течений и теплообмене в широком диапазоне геометрических режимных параметров.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. 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.
2. Экспериментальное исследование гидродинамической структуры опускающего 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.
3. Экспериментальное исследование опускающего 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.
4. Реализация метода условного осреднения по ансамблю для исследования структуры восходящего снарядного течения в трубе. Выбор критерия для идентификации газовых снарядов и пузырей.

5. 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.
6. 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.
7. 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.

Научная новизна.

- 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 опускного 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 опускного 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.

Достоверность полученных результатов основана на использовании отработанных методов измерений и строгом анализе погрешностей. Используемые методики измерений тестировались в однофазных потоках и сравнивались с известными в литературе зависимостями. Полученные экспериментальные результаты качественно совпадают с известными в литературе расчетами других авторов. Достоверность полученных результатов обусловлена также публикацией результатов исследований в жестко рецензируемых научных журналах.

Научная и практическая ценность.

Полученные результаты способствуют более глубокому пониманию процессов, происходящих в опускном пузырьковом течении, и влиянию газовой фазы на турбулентную структуру потока и могут быть использованы для реализации эффективных методов управления тепломассопереносом в газожидкостных потоках. Экспериментальные данные в наклонном канале позволяют выяснить влияние силы тяжести на движение газожидкостных смесей. Анализ экспериментальных данных позволяет создать реальную физическую картину газожидкостных течений и может служить основой разработки современных термогидравлических кодов, что поможет при создании технологического оборудования.

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментального исследования локальных средних и пульсационных характеристик опускного пузырькового потока в вертикальной трубе в турбулентном режиме течения.
2. Результаты экспериментального исследования опускного пузырькового течения при докритических числах Рейнольдса в «псевдоламинарном» режиме.
3. Результаты измерения локальных гидродинамических характеристик в жидких пробках и в пленках жидкости вокруг газовых снарядов в восходящем снарядном течении.
4. Результаты исследования влияния пузырей и угла наклона канала на гидродинамику и теплообмен в пузырьковом течении в наклонном плоском канале.

Личный вклад автора.

Основные научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, получены соискателем лично. Им получены экспериментальные данные, проведен их анализ и интерпретация, оценка погрешностей измерений, сформулированы заключения, послужившие основой выводов диссертации. Постановка решаемых задач проводилась диссертантом как лично, так и совместно с д.ф.-м.н. О.Н. Кашинским. Автор принимал непосредственное участие в создании и отладке систем измерения на основе электрохимического метода. Он разработал алгоритмы обработки данных, подготовил экспериментальные установки и измерительное оборудование, провел измерения и обработку экспериментальных данных, подготовил публикации по результатам исследований.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались на I Всесоюзной конференции "Методы диагностики двухфазных и реагирующих потоков" (Харьков 1988), на VIII Всесоюзной конференции "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах" (Ленинград 1990), на международной конференции Fluid Engineering Division Summer Meeting, Experimental and computational aspects of validation of multiphase flow CFD codes (Lake Tahoe 1993), на международной конференции Second International Conference on Multiphase Flow'95-Kyoto (Kyoto 1995), на международной конференции 6th International Frumkin Symposium "Fundamental Aspects of Electrochemistry" (Moscow 1995), на международном семинаре 4th International Workshop on Electrochemical Flow Measurements – Fundamentals and Applications (Lahnstein 1996), на международной конференции Third International Conference on Multiphase Flow (Lyon 1998), на международной конференции 13th International Congress of Chemical and Process Engineering (Praha 1998), на международной конференции International Symposium "Actual problems of physical hydrodynamics" (Novosibirsk 1999), на международной конференции International Symposium "Two-Phase Flow Modeling and Experimentation" (Pisa 1999, 2004), на международной конференции "Heat Transfer Science and Technology" (Beijing 2000), на международной конференции International Conference on Multiphase Systems "Dynamics of Multiphase Systems" (Ufa 2000), на международной конференции "Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics" (Pisa 2001), на международном семинаре EUROMECH 421 Colloquium "Strongly Coupled Dispersed Two-Phase Flows" (Grenoble 2001), на Си-

бирском теплофизическом семинаре (Новосибирск 2002, 2005, 2014, 2015, 2017), на Российской национальной конференции по теплообмену (Москва 2002, 2006, 2014), на международной конференции 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10) (Seoul 2003), на Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск 2004, 2012, 2016), на международной конференции "Потоки и Структуры в Жидкостях" (Москва 2005), на международной конференции 6th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion (Xi'an 2009), на международном семинаре IV International Seminar with elements of scientific school for young scientists (ISHM-IV) "Topical issues of heat and mass transfer at phase transitions and multiphase flows in modern chemical technology and energy equipment" (Novosibirsk 2016), в качестве приглашенного доклада на международной школе 2nd International School of Young Scientists "Interfacial Phenomena and Heat Transfer" (Novosibirsk, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 46 статей, из них 18 статей в журналах из перечня ВАК.

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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проведенных исследований, формулируется задача и цель исследований. Показана научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В первой главе приводится обзор теоретических и экспериментальных исследований гидродинамики пузырьковых газожидкостных течений, а также методов их диагностики. В современных расчетных моделях пузырьковых потоков используется эмпирическая информация о гидродинамической структуре течения (распределение локального газосодержания по сечению канала, трение на стенке). Большинство исследователей используют гипотезу Сато, Секогучи о турбулентности жидкости, наведенной относительным движением пузырей, и ее влиянии на собственную турбулентность жидкости. Такие модели с удовлетворительной точностью описывают профили скорости жидкости развитых турбулентных течений в ядре потока, в пристенной

области имеет место существенное расхождение расчетных и экспериментальных зависимостей. Модели, описывающие профили локального газосодержания, ограничиваются в основном случаем малых расходных газосодержаний, когда отсутствует коалесценция и дробление пузырей, а профиль скорости жидкости незначительно деформируется присутствием газовой фазы и его можно считать равным турбулентному однофазному.

Отмечается, что выполненные ранее работы характеризуются в основном недостаточно подробным описанием пристенной области течения, которая существенно влияет на процессы турбулентного переноса. В литературе отсутствуют также систематические и подробные экспериментальные данные по опускному пузырьковому течению, которое из-за своей симметричности наиболее привлекательно при построении теоретических моделей.

Вторая глава посвящена описанию методики измерений. Вначале дается краткое 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.

Далее идет описание методики измерения теплообмена газожидкостного потока с обогреваемой стенкой с помощью термосопротивлений. Оцениваются погрешности данного метода.

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

В третьей главе приводятся результаты исследования структуры потока и гидродинамических характеристик опускного пузырькового течения в вертикальной трубе в турбулентном режиме. Параметры опускного двухфазного течения исследовались для расходов, соответствующих приведенных скоростям жидкости $V_l = 0.5, 0.75, 1.0$ и 1.25 м/с. Значения приведенных скоростей газа V_g изменялись от 0.01 до 0.095 м/с. Эксперименты проводились для различных диаметров газовых пузырей d_b . Во всех исследованных режимах реализовывалось спутное опускное пузырьковое течение.

Визуальные наблюдения показали, что пузыри отходят от стенки, таким образом, вблизи стенки трубы существует слой жидкости, свободной от пузырей газа. Была проведена проверка осевой симметрии течения путем измерения трения в восьми позициях в одном и том же поперечном сечении трубы при разных углах для различных расходов

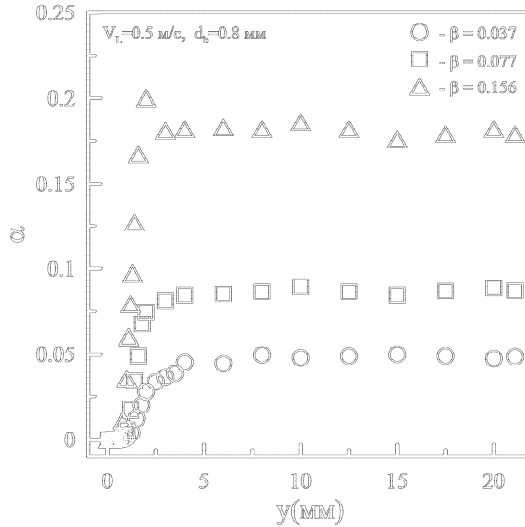


Рис. 1. Локальное газосодержание.

жидкости и при разных газосодержаниях. Отклонение локальных значений τ_w от осредненного по углу значения не превосходит 10% для скоростей жидкости $V_L > 0.75$ м/с. Для наименьших V_L отклонение не превосходит 20%. Таким образом, во всех случаях опускное пузырьковое течение можно считать осесимметричным.

Во всех режимах течения отношение трения на стенке осредненного по 8 датчика было выше однофазного значения при той же скорости жидкости, так что трение на стенке в опускном двухфазном потоке всегда выше, чем трение в однофазном, что не противоречит результатам других исследователей.

Профили локального газосодержания измерялись для различных значений расходов жидкости и газа (рис. 1). Все профили газосодержания демонстрируют нулевое значение α у стенки и довольно однородное распределение ненулевого значения в центральной части трубы. Область повышения α от нуля до значения в центре находится ближе к стенке при меньших значениях скорости жидкости.

Были рассчитаны средние величины газосодержания α_m посредством осреднения профилей газосодержания по поперечному сечению трубы $\alpha_m = \frac{2}{R^2} \int_0^R \alpha(r) r dr$. Почти во всех условиях α_m больше объемного расходного газосодержания.

Во всех режимах течения профили скорости жидкости для двухфазного потока более заполнены по сравнению с однофазными

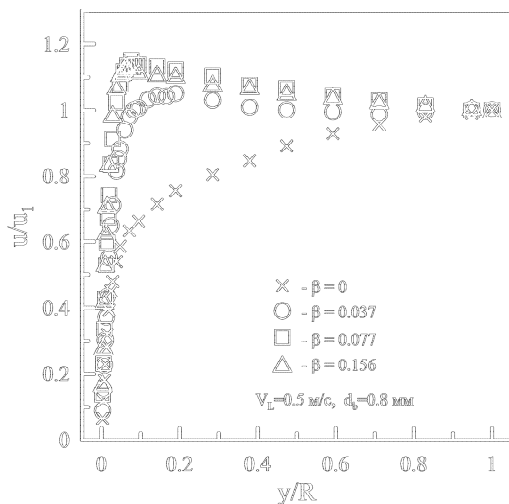


Рис. 2. Скорость жидкости.

(рис. 2.). Отмечено некоторое влияние размера пузырей: деформация профиля скорости слегка больше для крупных пузырей. Однако наибольшее влияние на распределение скорости оказывает приведенная скорость жидкости и объемное расходное газосодержание. Увеличение расходного газосодержания приводит к большему градиенту скорости вблизи стенки и, следовательно, к большему трению на стенке. При увеличении приведенной скорости жидкости форма профилей скорости приближается к однофазной.

Осредненные по поперечному сечению трубы значения скорости жидкости V_m рассчитывались из интегрирования профилей скорости жидкости V_l не превосходит 5.5% для $V_l = 0.75$ и 1 м/с, что близко к погрешности измерений. Для $V_l=0.5$ м/с расхождение между V_m и V_l было от 9% до 15% (для больших значений β). Эта разница, больше погрешности эксперимента, вероятно, возникает из-за асимметрии течения, которая больше при малых расходах жидкости. Это отклонение находится в пределах отклонений трения на стенке в распределении по углу от среднего значения.

Профили скорости жидкости, представленные в универсальных полулогарифмических координатах, довольно хорошо совпадают с однофазными зависимостями (рис. 3). При $V_l \geq 0.75$ м/с профиль скорости совпадает с однофазным распределением до координаты yu_τ/v

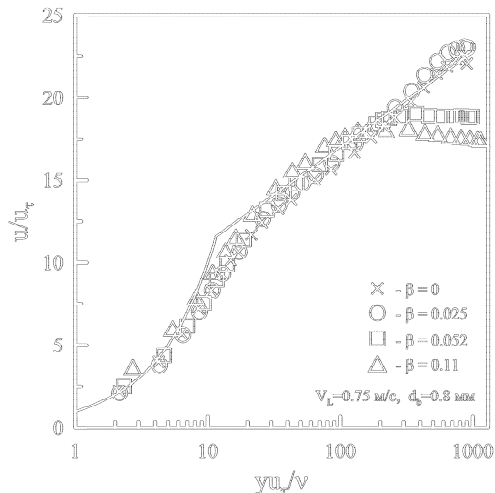


Рис. 3. Универсальный закон распределения скорости.

примерно 200. Для $V_L = 0.5$ м/с совпадение соблюдается до координат $y u_\tau / \nu$ от 50 до 70. На больших расстояниях от стенки происходит отклонение от однофазного распределения, вызванное выполаживанием профиля скорости.

Присутствие в потоке газовой фазы, как правило, изменяет пульсационную структуру течения. Важным параметром, характеризую-

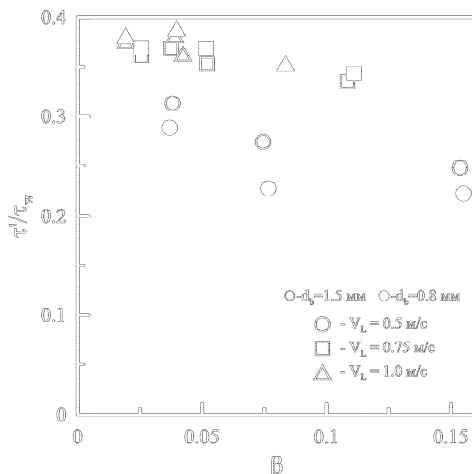


Рис. 4. Пульсации трения на стенке.

щим пульсации течения вблизи стенки, являются относительные пульсации трения на стенке τ'_w/τ_w , где τ'_w – среднеквадратичная интенсивность пульсаций трения на стенке. В однофазном потоке τ'_w/τ_w примерно одинакова для всех скоростей течения и равна $0.37 \div 0.38$. Измерения в восходящем пузырьковом течении (Накорякова и др.) продемонстрировали увеличение τ'_w/τ_w по сравнению с однофазным потоком. Результаты экспериментов в опускном течении представлены на рис. 4. Для $V_l=1$ м/с интенсивность пульсаций τ'_w/τ_w остается приблизительно такой же, как и в однофазном потоке ($\beta=0$). При меньших скоростях жидкости наблюдается уменьшение τ'_w/τ_w с ростом β . Это особенно выражено при $V_l=0.5$ м/с, значения τ'_w/τ_w уменьшаются до $0.23 \div 0.25$. Этот результат демонстрирует существование механизма подавления турбулентности в опускном потоке. Хотя относительные величины τ'_w/τ_w меньше, чем в однофазном потоке, размерные значения τ'_w либо равны, либо выше соответствующих значений в однофазном потоке, поскольку среднее трение на стенке в двухфазном потоке также увеличивается.

Относительная интенсивность пульсаций скорости жидкости (рис. 5) в разных участках поперечного сечения трубы показывает разное поведение. В центральной части трубы в двухфазном течении величина u'/u_1 выше, чем в однофазном потоке (профили с $\beta=0$), в частности при $V_l=0.5$ м/с. Это вызвано перемешиванием жидкости пузырями газа, движущимися относительно жидкости с определенной скоростью. Вблизи стенки величина u'/u_1 может быть как ниже, так и

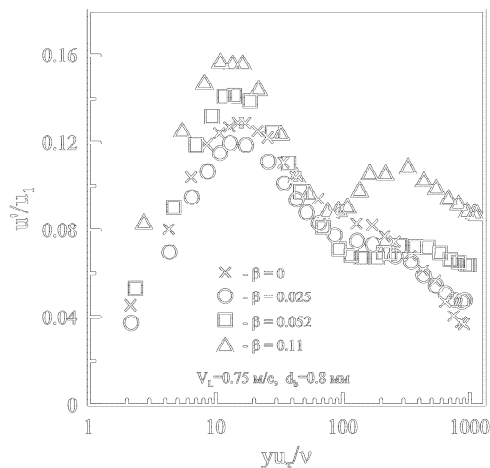


Рис. 5. Пульсации скорости жидкости.

выше, чем в однофазном потоке, в зависимости от газосодержания. Похожий результат получен для опускного течения в работе Wang и др.

Сравнение результатов, полученных для опускного пузырькового течения, с результатами для восходящих пузырьковых потоков показывает, что основным различием в структуре потоков является распределение пузырей по поперечному сечению трубы. Для опускных течений характерны профили с пиком газосодержания в центральной части канала и областью у стенки, почти полностью свободной от пузырей газа. Анализ полученных распределений газосодержания подтверждает предположения работы Zup, что основной причиной миграции пузырей в пузырьковом течении является боковая сила, действующая на пузырь, всплывающий в потоке с градиентом скорости. Эта сила имеет противоположные знаки в восходящем и опускном потоках вследствие различного направления относительной скорости пузыря по сравнению со скоростью жидкости. Таким образом, в опускном течении наблюдаются профили газосодержания с максимумами в центре, тогда как, в восходящем потоке доминируют профили с максимумами у стенки.

При малых скоростях жидкой фазы и малых расходных газосодержаниях газожидкостное течение демонстрирует поведение сходное с развитым турбулентным режимом. Эксперименты проводились в диапазоне приведенных скоростей жидкости от 0.2 до 1 м/с. Соответствующие числа Рейнольдса изменялись от 4200 до 20000. Однофазное течение в трубе являлось турбулентным, даже при наименьшей скорости жидкости $V_l=0.2$ м/с. Объемное расходное газосодержание β изменялось в пределах от 0.01 до 0.2.

Были проведены измерения трения на стенке для различных значений приведенной скорости жидкости и объемного расходного газосодержания. На рис. 6 представлена зависимость среднего трения на стенке τ_w от объемного расходного газосодержания β . Величина τ_w монотонно увеличивается с ростом β . В отличие от восходящего течения, в области низких газосодержаний не наблюдается неоднородностей. Для наименьших исследованных чисел Рейнольдса отношение τ_w к однофазному трению (при одинаковой приведенной скорости жидкости) значительно увеличивается. При наименьших скоростях жидкости $V_l=0.2$ и 0.3 м/с величины трения на стенке близки при всех значениях β . Для этих режимов основным параметром, влияющим на поток, является приведенная скорость газа.

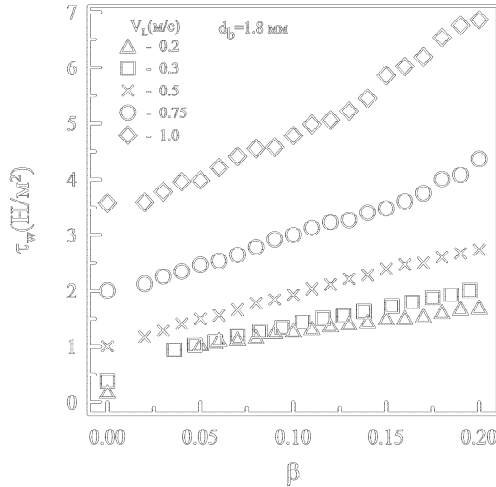


Рис. 6. Трение на стенке.

Распределение α в центральной части трубы достаточно однородно. Все профили α показывают нулевое значение вблизи стенки и довольно однородное распределение в центральной части трубы. Величина уровня газосодержания в центре трубы возрастает при увеличении объемного расходного газосодержания. Область нулевого газосодержания становится меньше при высоких V_l , но при меньших скоростях жидкости рост α от нулевого до максимального значения становится круче.

Наблюдается сильная деформация распределений скорости жидкости даже при малых расходных газосодержаниях (рис. 7). Двухфазные профили становятся выположенными по сравнению с однофазными турбулентными профилями скорости (профили с $\beta=0$). При $V_l=0.3$ м/с все профили имеют максимум вблизи стенки. Следует отметить, что при $V_l=0.3$ м/с сильная деформация профиля скорости происходит наименьших газосодержаниях ($\beta=0$). С увеличением приведенной скорости жидкости влияние газовой фазы на распределение жидкости уменьшается.

Средние по сечению трубы значения скорости жидкости V_m рассчитывались из измеренных профилей скорости по формуле $V_m = \frac{2}{R^2} \int_0^R u(r)(1 - \alpha)rdr$. Отклонение V_m от приведенной скорости жидкости не превышает 5%, что находится в пределах погрешности измерений.

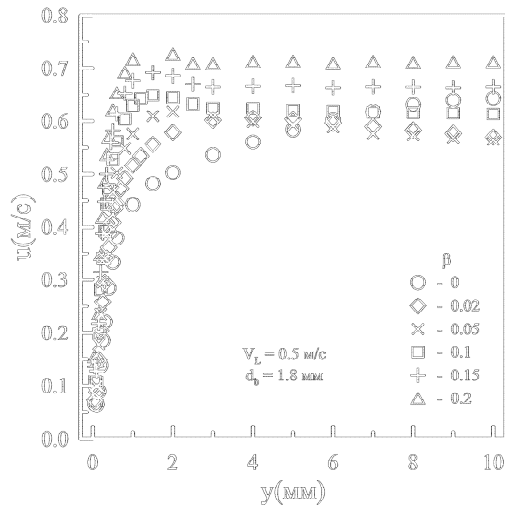


Рис. 7. Профили скорости жидкости.

Распределения относительной интенсивности пульсаций скорости жидкости u'/u представлены на рис. 8. Здесь u' - среднеквадратичное значение пульсаций скорости, u - осредненная скорость жидкости в той же точке. В разных областях потока пульсации ведут себя по-разному. В центральной части трубы значения u'/u выше, чем в одно-

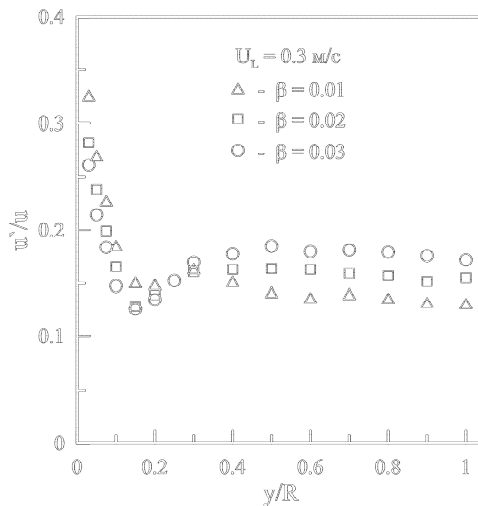


Рис. 8. Пульсации скорости жидкости.

фазном течении, их значение примерно постоянно. Данный факт является результатом перемешивания жидкости пузырями газа, движущимися относительно жидкости с определенной скоростью. Вблизи стенки значения u'/u ниже однофазных. Подавление пульсаций скорости жидкости в пузырьковом потоке увеличивается с ростом объемного расходного газосодержания. Следует отметить, что добавление в жидкость даже очень малого количества газа, ведет к значительному изменению картины течения.

На рисунке 9 показаны профили скорости жидкости, построенные универсальных полулогарифмических координатах «закона стенки». Здесь $U_+ = u/u_\tau$, $u_\tau = (\tau_w/\rho)^{1/2}$ – динамическая скорость, где τ_w – измеренное трение на стенке, ρ – плотность жидкости; $y_+ = yu_\tau/\nu$, ν – кинематическая вязкость жидкости. Наблюдается хорошее соответствие между однофазными и двухфазными профилями для $y_+ < 100$. При больших значениях y_+ отклонение от однофазного распределения вызвано выполаживанием профиля скорости. Кроме универсального однофазного распределения на данном рисунке показаны расчеты, выполненные Пахомовым и Тереховым [35]. Экспериментальные данные удовлетворительно совпадают с расчетами.

В четвертой главе рассматривается опускное пузырьковое течение при докритических числах Рейнольдса. Чтобы получить малые числа Рейнольдса при умеренных скоростях жидкой фазы необходимо повысить вязкость жидкости. Для повышения вязкости в рабочую жидкость был добавлен глицерин. Весовая концентрация глицерина

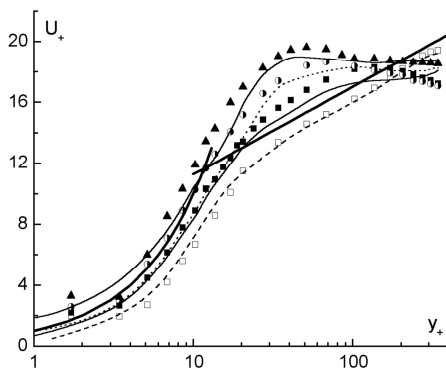


Рис. 9. Скорость жидкости в универсальных координатах ($\square$ - $\beta = 0$, $\blacksquare$ - 0.02, $\circ$ - 0.05, Δ - 0.1; $V_f = 0.5$ м/с, $d_b = 1.7$ мм).

равнялась 57%. При этом вязкость повышалась в пять раз по сравнению с водой. Эксперименты проводились при трех значениях приведенной скорости жидкости $V_L = 0.133, 0.271$ и 0.376 м/с. Соответствующие им числа Рейнольдса, определенные как $Re = V_L D / \nu$, равнялись 500, 1000 и 1500. При всех режимных параметрах потока однофазное течение было ламинарным. Значения объемного расходного газосодержания изменялись от 0.005 до $0.1 \div 0.2$. Диапазон β в экспериментах ограничивался появлением больших пузырей и переходом к снарядному потоку.

Измерения локального газосодержания показывает ту же картину, что и для турбулентного потока. Вблизи стенки α равняется нулю. Эта свободная от пузырей область легко заметна. Ширина этого свободного от пузырей слоя зависит как от скорости жидкости, так и от расходного газосодержания. Профили α в центральной части трубы выположены. Характерной чертой этих профилей является наличие максимума локального газосодержания на некотором расстоянии от стенки при высоких значениях β .

Профили скорости жидкости для тех же значений Re показаны на рис. 10. Наблюдается сильное отклонение двухфазных профилей от однофазных в течения Пуазейля (данные с $\beta=0$). Деформация профилей становится сильнее с увеличением объемного расходного газосодержания. Интересно отметить, что довольно сильное отклонение от однофазного параболического профиля имеет место даже при очень низких значениях β , таких как $0.005 \div 0.01$. Распределение $u(r)$ в цен-

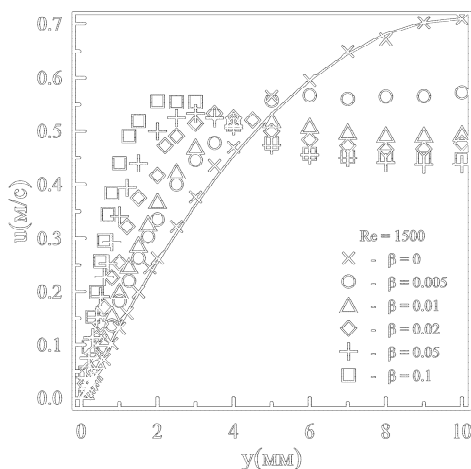


Рис. 10. Профили скорости жидкости.

тральной части трубы плоское для всех β . Как только локальное газосодержание становится ненулевым, профили скорости жидкости немедленно выполаживаются. Профили скорости жидкости в опускном течении также имеют локальный максимум в стороне от оси трубы при больших значениях β .

Профили относительных пульсаций скорости жидкости $\varepsilon_u = u'/u$ приведены на рис. 11. Здесь u' – среднеквадратичные пульсации скорости жидкости. В центральной части трубы ε_u является постоянной. Значения ε_u сильно зависят от расходного газосодержания и приведенной скорости жидкости. При всех параметрах течения имеется минимум пульсаций на некотором расстоянии от стенки. Позиция этого минимума зависит от скорости жидкости, он ближе к стенке при $Re=500$. Далее пульсации растут по приближению к центру трубы. Это результат развития наведенной пузырями турбулентности, вызванной перемешиванием жидкости пузырями. Поведение ε_u в центральной части трубы коррелирует с поведением профилей локального газосодержания. При $Re=500$ наблюдается эффект «насыщения флуктуаций». Значение ε_u увеличивается с ростом β от 0.005 до 0.5, а затем остается постоянным при росте β до 0.1. Подобные эффекты были отмечены в экспериментах при больших числах Рейнольдса. Также отмечено увеличение пульсаций скорости жидкости по мере приближения к стенке. В случае ламинарных чисел Рейнольдса пульсации скорости жидкости можно рассматривать как псевдотурбулентность. Пульсации в цен-

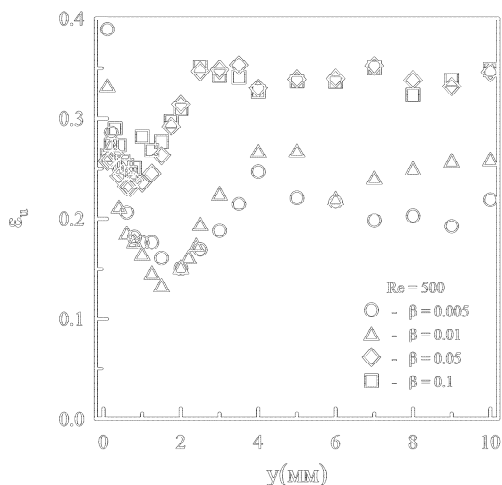


Рис. 11. Пульсации скорости жидкости.

тральной части трубы можно считать в явном виде возмущениями, наведенными пузырями. Причина увеличения флуктуаций в пристенной области не так очевидна, поскольку в этой части трубы локальное газосодержание равно нулю.

Трение на стенке монотонно увеличивается при росте газосодержания и уменьшается с увеличением скорости жидкости. Увеличение трения на стенке коррелирует с деформацией профилей скорости жидкости. Поведение пульсаций трения хорошо коррелируют с величинами пульсаций скорости вблизи стенки, когда $y \rightarrow 0$. Например, для $Re=1500$, $\beta=0.1$ наибольшая величина ε_u вблизи стенки равна 0.48, тогда как соответствующее значение τ'_w/τ_w равно 0.56. Следовательно, при докритических числах Рейнольдса наблюдается развитие турбулентности в жидкости. Это связано с сильным перемешиванием потока жидкости пузырями, движущимися вверх по потоку относительно жидкости. Однако, данный эффект не носит локальный характер, так как пузыри, движущиеся в центральной части трубы, генерируют пульсации жидкости в пристенной зоне течения.

Пятая глава посвящена исследованию структуры восходящего снарядного течения в вертикальной трубе. Исследование проводилось методом условного осреднения. Поток усреднялся отдельно в жидких пробках и в жидких пленках вокруг газовых снарядов. Измерения проводились в диапазоне приведенных скоростей жидкости от 0.5 до 1.0 м/с и объемных расходных газосодержаний от 0.2 до 0.5.

В результате обработки реализаций двойного датчика проводимости были получены данные по скоростям снарядов в различных режимах. Средняя скорость снарядов оказалась ниже зависимости, приведенной в работе Коллинза. В одном и том же режиме (при постоянных значениях приведенных скоростей жидкости и газа) скорости индивидуальных снарядов существенно различались. Значения дисперсии скорости снарядов сильно возрастают с ростом расходного газосодержания. Это свидетельствует о том, что при больших значениях газосодержания снарядное течение становится менее регулярным.

Осредненные значения трения на стенке в пленке, обтекающей газовый снаряд, для различных длин снарядов представлены на рис. 12. Видно, что трение уменьшается по мере удаления от носика снаряда и может принимать отрицательные значения при больших длинах снарядов. Для разных значений длины газовых снарядов и газосодержаний характер изменения трения с ростом расстояния от начала снаряда остается практически неизменным. Следует отметить, что в области отрицательного трения не наблюдалось стабилизации трения по длине, что, по всей видимости, связано с недостаточной длиной газо-

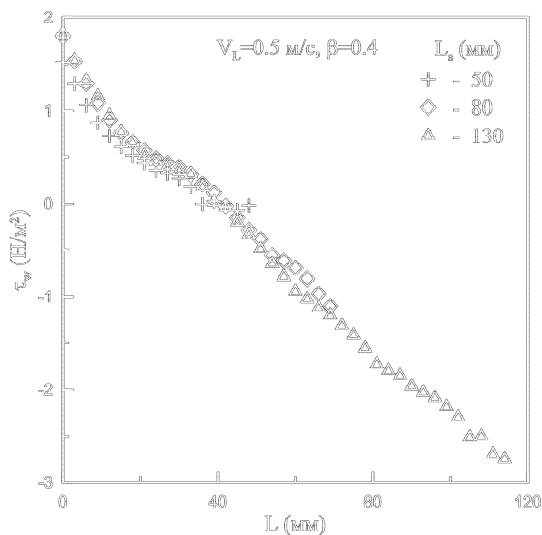


Рис. 12. Трение в пленке.

вых снарядов. В начальном участке жидкой пробки, следующей за газовым снарядом, происходит резкое возрастание трения, связанное с разрушением пристенной струи жидкости, вытекающей из-под газового снаряда. В результате образуется циркуляционное течение (тороидальный вихрь), приводящее к существенной деформации профиля скорости по длине жидкой пробки.

Результаты продольных распределений скорости вдоль жидкой пробки приведены на рис. 13. Здесь координата x отсчитывается от начала жидкой пробки, то есть от конца предшествующего газового снаряда. Видно, что распределение скорости по длине пробки ведет себя совершенно по-разному в зависимости от расстояния от стенки. При малых значениях y в начале пробки значение скорости сильно занижено. Достаточно интересным является поведение продольного распределения скорости при $y=2.5$ мм. Вначале происходит быстрое возрастание скорости вблизи доннышка газового снаряда, затем по всей длине жидкой пробки скорость остается практически постоянной. Из записей реализаций сигналов были получены распределения скорости для всех измеренных значениях поперечной координаты. Эти распределения показывают плавный переход от распределения вблизи стенки до распределения на оси трубы.

Из полученных продольных распределений скорости жидкости были построены поперечные распределения (рис. 14) для различных

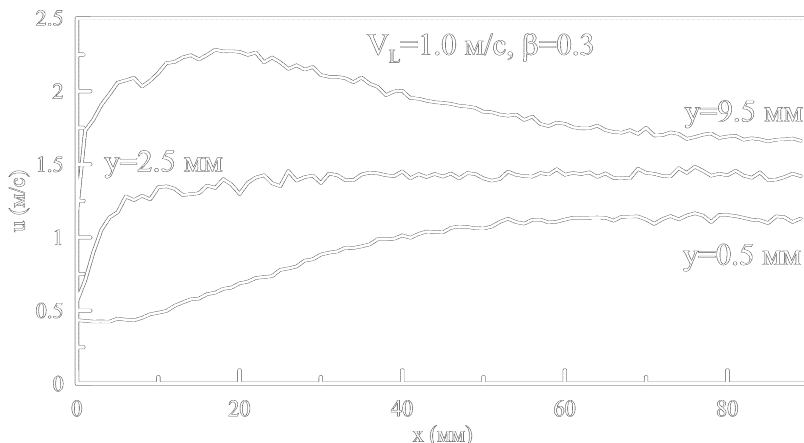


Рис. 13. Скорость жидкости вдоль жидкой пробки.

значений координаты x , то есть расстояний от начала жидкой пробки. Видно, что происходит значительная деформация профилей скорости по сравнению с однофазным течением в трубе. Для сравнения на рисунках сплошными линиями показаны однофазные турбулентные профили с тем же значением скорости на оси трубы. Профили скорости значительно менее заполненные, чем однофазные, в начальной области жидкой пробки. При увеличении координаты y профили приближаются к однофазным.

Полученные продольные и поперечные распределения скорости являются результатом осреднения по ансамблю реализаций. Они демонстрируют крупномасштабную структуру течения в жидкой пробке

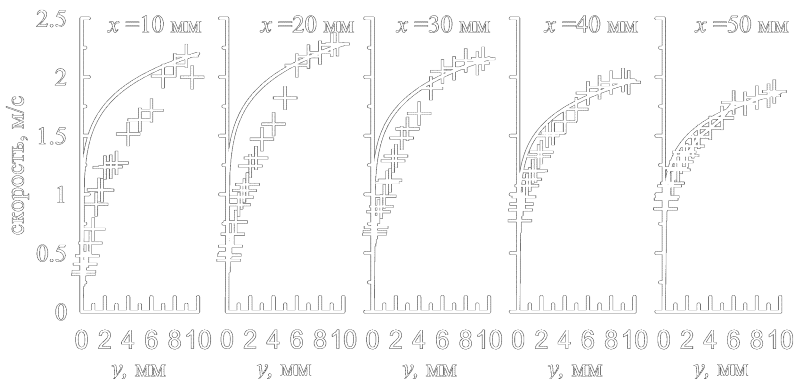


Рис. 14. Поперечные профили скорости в жидкой пробке $V_L=1.0$ м/сек, $\beta=0$.

снарядного потока. На эту крупномасштабную структуру накладываются турбулентные пульсации скорости, носящие случайный характер. Основной причиной возникновения показанной выше структуры является влияние кольцевой пленки жидкости, вытекающей из-под предыдущего газового снаряда. В начальном участке жидкой пробки это течение переходит в пристенную струю, направленную навстречу потоку. В результате, в начальном участке жидкой пробки образуется торoidalный вихрь, который существенно увеличивает скорость на оси трубы и приводит к ее уменьшению вблизи стенки. В целом поперечные профили скорости жидкости вдоль жидкой пробки являются либо менее заполненными, чем в однофазном течении, либо совпадают с последними. Это приводит к тому, что профили скорости, осредненные за все время измерения, также являются менее заполненными. В этом отношении снарядное течение отличается от восходящего пузырькового течения в вертикальной трубе, в котором профили скорости являются значительно более заполненными по сравнению с однофазными.

В шестой главе приводятся данные по исследованию гидродинамики и теплообмена пузырькового течения в наклонном плоском канале. Эксперименты проводились в диапазоне приведенных скоростей жидкости от 0.3 до 1.1 м/с. Объемное расходное газосодержание изменялось от 0.01 до 0.2. Во всех исследованных режимах поток оставался пузырьковым. Визуальные наблюдения показали, что распределение пузырей по сечению канала стабилизируется уже на расстоянии ~200 мм от места ввода газовой фазы в поток. Кроме того, проводились эксперименты, в которых расстояние от места ввода газа до измеритель-

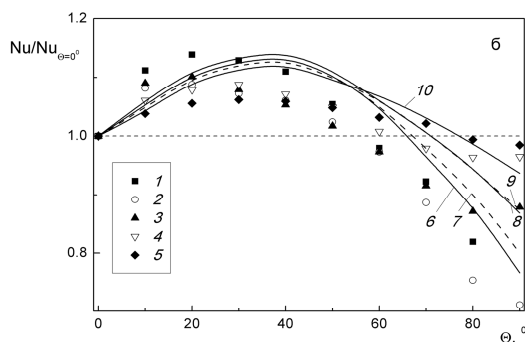


Рис. 15. Зависимость коэффициента теплоотдачи от угла наклона (1÷5 - $Re = 5000, 7800, 12500, 18500, 25000$).

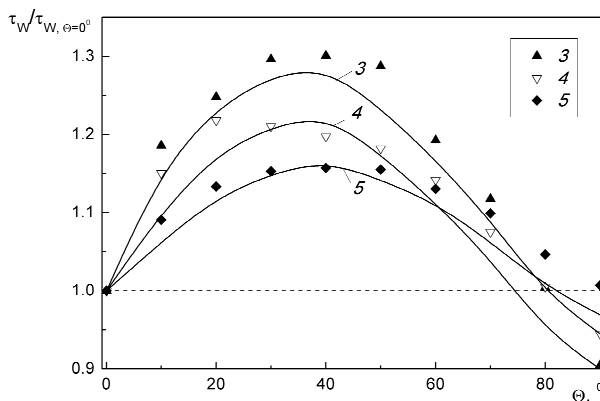


Рис. 16. Зависимость трения на стенке от угла наклона ($3 \div 5$ - $Re = 12500, 18500, 25000$).

ного участка было равно 450 мм. Было показано, что дальнейшее увеличение расстояния от генератора пузырей до измерительного участка не оказывает влияния на результаты измерений.

Зависимость числа Нуссельта (рис. 15) и касательного напряжения на стенке (рис. 16) от угла наклона качественно похожи. Максимумы теплоотдачи и касательного напряжения на стенке наблюдаются в диапазоне углов наклона канала $\theta \approx 20^\circ \div 50^\circ$. Это объясняется тем, что, во-первых, при этих углах газовая фаза сосредоточена вблизи верхней (измерительной) стенки канала, а во-вторых, проекция силы Архимеда на ось канала достаточно велика. Это приводит к тому, что, всплывая вблизи верхней стенки канала, пузыри увеличивают вихревой перенос импульса и тепла в этой области. При углах наклона канала близких к вертикали распределение пузырей по сечению канала становится более однородным, а концентрация пузырей вблизи верхней стенки снижается, что приводит к снижению вклада пузырей в вихревой перенос у верхней стенки. При углах наклона канала близких к горизонтальному, газовая фаза сосредоточена вблизи верхней стенки, но проекция силы Архимеда на ось канала близка к нулю, и скорость пузырей относительно жидкости мала, что также уменьшает вклад газовой фазы в вихревой перенос. С увеличением приведенного числа Рейнольдса жидкости зависимости Nu и τ_w от угла наклона становятся слабее. Линиями на данных графиках показаны расчеты Пахомова и Терехова [54]. Отмечено удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

Зависимость коэффициента теплоотдачи от объемного расходного газосодержания имеет довольно сложный характер. Малые добавки газа (до 1 %) в поток жидкости приводят к резкому увеличению коэффициента теплоотдачи по сравнению с однофазным течением. При росте газосодержания от 5 % до 15 % происходит постепенный рост коэффициента теплоотдачи. При газосодержании 1÷2 % наблюдается небольшой экстремум теплоотдачи. Этот экстремум может быть связан с тем, что при увеличении расхода газа диаметры пузырей, отрывающихся от капилляров, несколько увеличиваются, кроме того, при увеличении газосодержания усиливается процесс коалесценции пузырей. А, как известно, мелкодисперсная газовая фаза оказывает большее влияние на интенсификацию процессов переноса. Качественно похожее поведение показывает зависимость трения на стенке от газосодержания. Здесь также малые добавки газа (до 1 %) в поток жидкости приводят к резкому увеличению трения по сравнению с однофазным течением. При росте газосодержания от 5 % до 15 % происходит постепенный рост значений трения на стенке.

При одних и тех же параметрах течения степень возрастания теплообмена по отношению к однофазному течению оказывается несколько меньше, чем степень возрастания трения. Возможно, это в определенной степени связано с частичной блокировкой поверхности теплообмена газовыми пузырями, которые в большинстве режимов прижаты к верхней стенке канала, где расположен нагреватель.

На рисунке 17 представлены графики зависимости среднего диаметра газовых пузырей на различных расстояниях от места ввода газа в поток жидкости и при различных углах наклона канала. На расстоянии 100 мм диаметр газовых пузырей увеличивается практически линейно. По мере удаления от генератора пузырей растет и средний диаметр пузырей. Это связано с процессом коалесценции пузырей. Видно, что при значениях объемного расходного газосодержания $\beta < 2\%$ средний диаметр пузырей растет медленно и практически не отличается для всех трех кривых (100 мм, 470 мм и 900 мм). Это связано с тем, что при малых газосодержаниях взаимодействие пузырей практически отсутствует и средний диаметр пузырей на всем протяжении канала не меняется. По мере увеличения газосодержания возрастает и вероятность взаимодействия пузырей. Это приводит к увеличению среднего диаметра пузырей с увеличением расстояния от генератора.

При различных углах наклона средний диаметр газовых пузырей демонстрирует схожее поведение. На малых расстояниях от места ввода газа в поток жидкости ($L = 100$ мм) угол наклона канала в выбранном диапазоне не оказывает влияния на средний диаметр газовых пу-

зырей. На расстояниях $L = 470$ и $L = 900$ мм (рис. 18) от места ввода газа в поток жидкости сравнение гистограмм при различных углах наклона канала показывает, что разброс диаметров при увеличении угла наклона увеличивается. В то же время, на значения среднего диаметра на данных расстояниях угол наклона так же не оказывает значительного влияния. Небольшое отклонение возникает только при значении $\theta = 60^\circ$ при значениях объемного расходного газосодержания $\beta > 8\%$. Это, возможно, объясняется тем, что при большом значении объемного расходного газосодержания такие углы наклона канала позволяют пузырькам активно группироваться, и практически все пузыри уже коалесцировали, таким образом, увеличивается значение среднего диаметра.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика проведения комплексного экспериментального исследования гидродинамической структуры двухфазных газожидкостных течений в различных условиях, и детальное изучение структуры пристенной области в различных режимах.

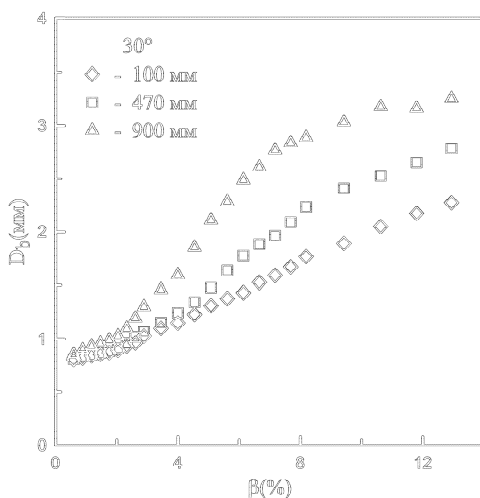


Рис. 17. Влияние расстояния от смесителя.

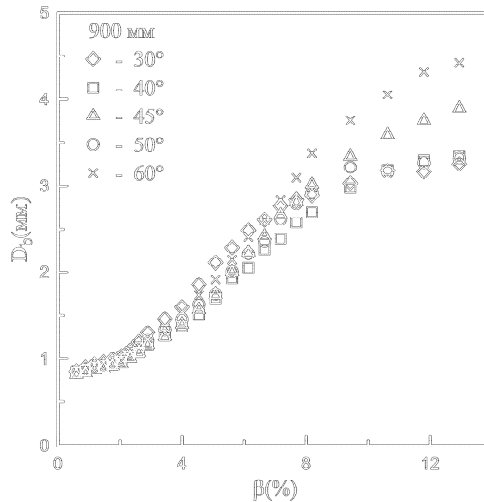


Рис. 18. Зависимость от угла наклона.

- Исследования опускного пузырькового течения в развитом турбулентном режиме показали, что при всех значениях приведенных скоростей жидкости и газа наблюдается концентрация газовой фазы в центральной части трубы и выполаживание профиля скорости жидкости. Впервые обнаружен эффект подавления пульсаций трения и скорости жидкости, происходит демпфирование пульсаций по сравнению с однофазным потоком. Пульсационные характеристики течения существенно зависят от дисперсности газовой фазы. Универсальные профили скорости, построенные по измеренному трению на стенке, показывают совпадение с однофазным законом в пристенной области, и сильное отклонение в центральной части трубы, вызванное сильной деформацией профиля скорости присутствием пузырей газа.
- В опускном пузырьковом течении при докритических числах Рейнольдса жидкой фазы наблюдается качественное подобие с течением в развитом турбулентном режиме. Отмечено развитие псевдотурбулентности, наведенной пузырями, даже при очень малых значениях расходного газосодержания. Показано, что основным фактором, определяющим структуру течения, является дифференциальная плавучесть, вызванная неравномерным распределением газовой фазы по сечению трубы.
- Получена осредненная структура течения в жидкой пробке восходящего снарядного течения методом условного осреднения. Пока-

зано, что в начальном участке жидкой пробки образуется торoidalный вихрь, который существенно увеличивает скорость на оси трубы и приводит к ее уменьшению вблизи стенки. Профили скорости значительно менее заполнены, чем турбулентные однофазные в начальной области жидкой пробки; при увеличении расстояния от доньшка снаряда профили приближаются к однофазным. Трение в пленке, обтекающей снаряд, уменьшается по мере удаления от носика снаряда и может принимать отрицательные значения при больших длинах снарядов. В начальном участке жидкой пленки вблизи носика снаряда наблюдается демпфирование пульсаций трения, вызванное сильным ускорением течения жидкости. Вблизи доньшка снаряда интенсивность пульсаций увеличивается из-за возмущающего действия вихря за снарядом.

5. Показано, что в газожидкостном течении в прямоугольном наклонном канале угол наклона канала по отношению к горизонту оказывает существенное влияние на трение и теплообмен; наибольшие значения трения и теплообмена соответствуют углам наклона канала $\theta \approx 20^\circ \div 50^\circ$; отмечено качественное подобие поведения трения и теплообмена при изменении угла наклона канала и объемного расходного газосодержания. При малых добавках газа (менее 2%) происходит резкое увеличение теплоотдачи и трения на стенке; влияние газовой фазы на трение и теплообмен уменьшается с увеличением приведенной скорости жидкости. При малых значениях объемного расходного газосодержания ($\beta < 2\%$) коалесценция пузырей практически отсутствует, поэтому угол наклона канала и расстояние от места ввода газа в поток жидкости не оказывают влияния на средний диаметр газовых пузырей.

Полученные результаты служат основой для верификации современных моделей расчета двухфазных потоков.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Кашинский О.Н., Горелик Р.С., Рандин В.В. Скорости фаз в пузырьковом газожидкостном течении // ИФЖ, 1989, т.57, N 1, с.12-15, (из перечня ВАК).
2. Kashinsky O.N., Timkin L.S., Randin V.V., Yerycheva O.N. Direction-specific characteristics of three-component electrodiffusional velocity probe // J. Appl. Electrochem., 1994, N 24, p.694-696, (из перечня ВАК).
3. Kashinsky O.N., Gorelik R.S., Randin V.V. Upward bubbly flow in a small diameter vertical pipe // Russ. J. Eng. Thermophysics, 1995, Vol.5, N 2, p.177-193, (из перечня ВАК).
4. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Randin V.V., Timkin L.S. Gas-liquid bubbly flow in vertical pipes // Journal of Fluids Engineering, 1996, Vol.118, p.377-382, (из перечня ВАК).
5. Kashinsky O.N., Randin V.V. Downward bubbly gas-liquid flow in a vertical pipe // Int. J. Multiphase Flow, 1999, Vol. 25, No. 1, p. 109-138, (из перечня ВАК).
6. Кашинский О.Н., Рандин В.В. Опускное газожидкостное пузырьковое течение в вертикальной трубе // Теплофизика и аэромеханика, 1999, т. 6, N 2, с. 235-246, (из перечня ВАК).
7. Kashinsky O.N., Randin V.V. Downward bubbly flow at low liquid velocities // Russ. J. Eng. Thermophysics, 1999, Vol. 9, N 1-2, p.113-128, (из перечня ВАК).
8. Kashinsky O.N., Gorelik R.S., Randin V.V. Structure of upward slug flow in a vertical pipe // J. Eng. Thermophysics, 2002, Vol. 11, N 1, p.105-113, (из перечня ВАК).
9. Кашинский О.Н., Рандин В.В., Курдюмов А.С. Структура восходящего снарядного течения в вертикальной трубе // Теплофизика и аэромеханика, 2004, Т. 11, N. 2, с. 277-284, (из перечня ВАК).
10. Кашинский О.Н., Рандин В.В., Лобанов П.Д., Чимитов Т.Д. Опускное пузырьковое течение при малых расходных газосодержаниях // Теплофизика и аэромеханика, 2004, Т. 11, N 4, с. 619-624, (из перечня ВАК).
11. Кашинский О.Н., Рандин В.В., Лобанов П.Д., Богословцев Г.В. Влияние дисперсности газовой фазы на характеристики опускного пузырькового течения // Теплофизика и аэромеханика, 2005, Т. 12, № 4, с.637-643, (из перечня ВАК).
12. O.N. Kashinsky, V.V. Randin, P.D. Lobanov, M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov. Experimental and numerical study of downward bubbly flow in a pipe // Int. J. Heat and Mass Transfer, 2006, Vol. 49, p. 3717-3727, (из перечня ВАК).

13. Кашинский О.Н., Рандин В.В., Курдюмов А.С. Трение на стенке в восходящем снарядном течении в вертикальной трубе // Теплофизика и Аэромеханика, 2006, Т.13, № 3, с. 411-416, (из перечня ВАК).
14. O.N. Kashinsky, V.V. Randin, P.D. Lobanov. The influence of a small gas addition to the structure of gas-liquid downward flow in a tube // Journal of Engineering Thermophysics, 2008, Vol. 17, No 2, p. 120-125, (из перечня ВАК).
15. Кашинский О.Н., Рандин В.В., Чинак А.В. Влияние ориентации канала на теплообмен и трение в пузырьковом течении // Теплофизика и Аэромеханика, 2013, Т. 20, N. 4, с. 401-408, (из перечня ВАК).
16. O. N. Kashinsky, V.V. Randin, A. V. Chinak. Heat transfer and shear stress in a gas-liquid flow in an inclined plane channel // Journal of Engineering Thermophysics, 2014, Vol. 23, No. 1, pp. 39-46, (из перечня ВАК).
17. А. Е. Гореликова, О. Н. Кашинский, М. А. Пахомов, В. В. Рандин, В. И. Терехов, А. В. Чинак. Турбулентная структура течения и теплоперенос в наклонном пузырьковом потоке. Экспериментальное и численное исследование // Известия РАН. Механика жидкости и газа, 2017, Т. 52, № 1. с. 117–129, (из перечня ВАК).
18. A.V. Chinak, A.E. Gorelikova, O.N. Kashinsky, M.A. Pakhomov, V.V. Randin, V.I. Terekhov. Hydrodynamics and heat transfer in an inclined bubbly flow // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 118, pp. 785–801, (из перечня ВАК).
19. Kashinsky O.N., Gorelik R.S., Randin V.V. Structure of an ascending slug flow in a vertical pipe // Heat Transfer Research, 2004, Vol. 35, I 1&2, p. 85-91.
20. O.N. Kashinskii, V.V. Randin, A.S. Kurdyumov. Evolution of local characteristics of an ascending slug flow in a vertical pipe // Heat Transfer Research, 2007, Vol. 38, No 5, p. 473-482.
21. Гореликова А. Е., Кашинский О. Н., Рандин В. В., Чинак А. В. Влияние расхода газа на диаметр газовых пузырей в восходящем пузырьковом течении в плоском наклонном канале. Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2014. Т. 9, вып. 2. с. 136–144.
22. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Timkin L.S., Randin V.V. Gas-liquid bubbly flow in vertical pipes // FED-Vol. 180, Experimental and computational aspects of validation of multiphase flow CFD codes, Ed. I. Celic et al., 1994, p.101-106.
23. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Randin V.V. Downward slug flow in vertical pipe // Proceedins of The Second International Conference on

- Multiphase Flow '95-Kyoto. April 3-7, 1995, Kyoto, Japan, p. IF2-39 – IF2-42.
24. Kashinsky O.N., Chinak A.V., Randin V.V. Downward bubbly flow in a vertical pipe // Third International Conference on Multiphase Flow, Lyon, France, June 8-12, 1998, CD-ROM of full texts, 7 p.
 25. Kashinsky O.N., Randin V.V. Downward bubbly gas-liquid flow in a vertical pipe // 13th International Congress of Chemical and Process Engineering, Praha, Czech Republic, 23-28 August 1998, CD-ROM of full texts, 6 p.
 26. Kashinsky O.N., Randin V.V. Downward bubbly gas-liquid flow in a vertical pipe // Transactions of the International Symposium "Actual problems of physical hydrodynamics", Novosibirsk, Russia, 19-23 April 1999, 3 p.
 27. Kashinsky O.N., Randin V.V. Bubbly flows in chemical and biochemical engineering // Transactions of the International Symposium "Actual problems of physical hydrodynamics", Novosibirsk, Russia, 19-23 April 1999, p. I-27–I-29.
 28. Kashinsky O.N., Randin V.V. Downward bubbly flow at low liquid velocities // Two-Phase Flow Modeling and Experimentation. Proc. of the Second International Symposium. Pisa, Italy, 23-26 May, 1999, Vol. 2, p. 1063-1069.
 29. Kashinsky O.N., Randin V.V. Downward laminar gas-liquid flow in a vertical pipe // Heat Transfer Science and Technology 2000, ed. Bu-Xuan Wang, Hier Education Press, Beijing, China, 2000, p. 524-529.
 30. Kashinsky O.N., Randin V.V. Downward bubbly flow in a vertical pipe // Dynamics of Multiphase Systems. Proceedings of International Conference on Multiphase Systems, June 15-17, 2000. Ufa, p. 65-70.
 31. Kashinsky O.N., Gorelik R.S., Randin V.V. Structure of upward slug flow in a vertical pipe // Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics 2001, ed. G.P. Celata, P.O. Marko, A. Goulas, A. Mariani, Edizioni ETS, Pisa, 2001, p. 1471-1475.
 32. Kashinsky O.N., Randin V.V. Downward laminar gas-liquid flow in a vertical pipe // Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics 2001, ed. G.P. Celata, P.D. Marko, A. Goulas, A. Mariani, Edizioni ETS, Pisa, 2001, p. 1369-1373.
 33. Kashinsky O.N., Randin V.V. Hydrodynamic structure of downward bubbly flow // EUROMECH 421 Colloquium "Strongly Coupled Dispersed Two-Phase Flows", 10-12 September, 2001, Grenoble, France, p. 4.1-4.2.
 34. Кашинский О.Н., Рандин В.В. Гидродинамическая структура опускного пузырькового течения // XXVI Сибирский теплофизиче-

- ский семинар. Новосибирск, 17-19 июня 2002 г. CD-ROM тексты докладов, 4 с.
35. Кашинский О.Н., Горелик Р.С., Рандин В.В. Структура восходящего снарядного течения в вертикальной трубе // Труды третьей Российской национальной конференции по теплообмену, Москва, 21-25 октября 2002 г., Москва: изд. МЭИ, 2002, с. 68-71.
 36. V. Artemyev, Y. Kornienko, O. Kashinsky, V. Randin. Numerical and experimental investigation of anomalous shear stress and heat transfer behavior in two-phase bubble flows // 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10), Seoul, Korea, October 5-9, 2003, 6 p.
 37. Кашинский О.Н., Рандин В.В., Курдюмов А.С. Эволюция локальных характеристик восходящего снарядного течения в вертикальной трубе // Материалы V Минского международного форума по тепло- и массообмену, Минск, 24-28 мая 2004 г., докл. 5-25, 8 с.
 38. Kashinsky O.N., Randin V.V., Kurdumov A.S. Evolution of local characteristics of upward slug flow in a vertical pipe // Proceedings of 3rd International Symposium on Two-Phase Flow Modeling and Experimentation. Pisa, 22-24 September 2004, paper ven06, 6 p.
 39. Кашинский О.Н., Рандин В.В., Лобанов П.Д., Пахомов М.А., Терехов В.И. Исследование структуры газожидкостных опускных течений // Доклады 13-ой Межд. Конференции "Потоки и Структуры в Жидкостях", М.: Изд-во ИПМ РАН. 2005. С. 250-253.
 40. Кашинский О.Н., Рандин В.В., Лобанов П.Д., Богословцев Г.В. Пульсационные характеристики опускного течения при малых расходных газосодержаниях // Труды XXVIII Сибирского теплофизического семинара СТС-28. Новосибирск. 2005. CD-ROM. Доклад № 048, 4 с.
 41. Рандин В.В., Курдюмов А.С. Трение на стенке в восходящем снарядном течении в вертикальной трубе // Труды четвертой Российской национальной конференции по теплообмену, Москва, 23-27 октября 2006 г., Москва: Изд-во МЭИ. 2006. Т. 5, с. 269-271.
 42. O.N. Kashinsky, V.V. Randin, P.D. Lobanov, M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov. Flow and local void fraction in downward bubbly turbulent flow in a pipe // 6th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion, Xi'an, China, 11-15 July 2009, Paper No. MF-14, 6 p.
 43. А.Е. Гореликова, О.Н. Кашинский, В.В. Рандин, А.В. Чинак. Влияние пузырей на теплообмен и гидродинамику течения в плоском наклонном канале // Шестая российская национальная конференция

- по теплообмену (РНКТ-6). 27-31 октября 2014 года, Москва. [Электронный ресурс]. CD-ROM. Доклад № 221, 4 с.
44. Гореликова А. Е., Кашинский О. Н., Рандин В. В., Чинак А. В. Газожидкостное течение в наклонном плоском канале // Всероссийская конференция XXXI «Сибирский теплофизический семинар», 17-19 ноября 2014, Новосибирск. [Электронный ресурс]. CD-ROM. Доклад № 8-4-03. С. 327-330.
45. Гореликова А. Е., Рандин В. В., Чинак А. В. Влияние коалесценции на диаметр газовых пузырей в наклонном плоском канале // Всероссийская конференция XXXII «Сибирский теплофизический семинар», 19-20 ноября 2015, Новосибирск. С. 105-106.
46. А. Е. Гореликова, В. В. Рандин, А. В. Чинак. Влияние газовых пузырей и угла наклона на теплообмен в двухфазном газожидкостном течении в плоском наклонном канале // [Электронный ресурс]. CD-ROM. Доклады и сообщения. Минский международный форум по тепломассообмену ММФ-XV, Минск, 23-26 мая 2016 г. Доклад 2-09, 9 с.

Подписано к печати _____ 2018 г. Заказ №
Формат 60×84/16. Объем 2 уч.-изд. л. Тираж 150 экз.

Отпечатано в ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1