

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



Лобанов Павел Дмитриевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ И  
ТЕПЛООБМЕНА В ЭЛЕМЕНТАХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация на соискание ученой степени

доктора технических наук

Новосибирск 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                           | 6  |
| 1 Проблемы моделирования гидродинамики и теплообмена в элементах ядерных энергетических установок ..... | 12 |
| 1.1 Теплогидравлика тепловыделяющих сборок реакторных установок. ....                                   | 13 |
| 1.2 Гидродинамика и теплообмен двухфазных потоков .....                                                 | 31 |
| 1.2.1 Формирование и эволюция пузырей газа в теплоносителях реакторных установок ....                   | 33 |
| 1.2.2 Структура течения вблизи присоединенных пузырей .....                                             | 37 |
| 1.2.3 Исследования нисходящего пузырькового потока .....                                                | 40 |
| 1.2.4 Особенности отрывных пузырьковых потоков .....                                                    | 43 |
| 1.2.5 Гидродинамика и теплообмен двухфазного потока в тепловыделяющих сборках .....                     | 45 |
| 1.3 Неизотермические потоки в камерах смешения .....                                                    | 48 |
| 2 Методы экспериментальных исследований гидродинамики и теплообмена .....                               | 51 |
| 2.1 Бесконтактные методы исследования. ....                                                             | 51 |
| 2.2 Контактные методы .....                                                                             | 55 |
| 2.3 Методы, применявшиеся в данном исследовании .....                                                   | 58 |
| 2.3.1 Краткое описание экспериментальной модели тепловыделяющей сборки .....                            | 58 |
| 2.3.2 Метод определения коэффициентов трения и гидравлического сопротивления .....                      | 58 |
| 2.3.3 Методика измерения осевой скорости.....                                                           | 59 |
| 2.3.4 Методика измерения касательных напряжений.....                                                    | 61 |
| 2.3.5 Метод исследования теплообмена.....                                                               | 61 |
| 2.3.6 Метод измерения осредненной и пульсационной скорости .....                                        | 64 |
| 3 Гидродинамика и теплообмен потока в тепловыделяющей сборке .....                                      | 65 |
| 3.1 Экспериментальные исследования в вертикальных сборках стержней .....                                | 65 |
| 3.1.1 Описание экспериментальных стендов .....                                                          | 65 |
| 3.1.2 Перепад давления и гидравлическое сопротивление .....                                             | 69 |

|       |                                                                                                                                      |     |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1.3 | Данные по влиянию расстояния между дистанционирующими и перемешивающими решетками на коэффициент гидравлического сопротивления ..... | 73  |
| 3.1.4 | Распределение касательных напряжений на стенке имитатора твэла .....                                                                 | 75  |
| 3.1.5 | Влияние дистанционирующих решеток на распределение касательных напряжений ..                                                         | 75  |
| 3.1.6 | Данные по теплообмену за дистанционирующей решеткой .....                                                                            | 76  |
| 3.1.7 | Данные по распределению осевой скорости за ДР .....                                                                                  | 79  |
| 3.1.8 | Влияние диаметра и относительного шага твэлов на поток .....                                                                         | 85  |
| 3.2   | Исследование двухфазного течения в тепловыделяющей сборке .....                                                                      | 91  |
| 3.2.1 | Исследования в потоке с впрыском газа из одиночного сопла .....                                                                      | 93  |
| 3.2.2 | Параметры потока при распределенном вводе газа .....                                                                                 | 100 |
| 3.3   | Выводы .....                                                                                                                         | 103 |
| 4     | Гидродинамика и теплообмен двухфазных потоков в элементах реакторных установок                                                       | 104 |
| 4.1   | Структура нисходящих пузырьковых течений .....                                                                                       | 105 |
| 4.1.1 | Описание экспериментального стенда .....                                                                                             | 105 |
| 4.1.2 | Распределение напряжения трения на стенке .....                                                                                      | 107 |
| 4.1.3 | Влияние размера пузырей на гидродинамику потока и теплообмен при постоянных расходах жидкости и газа .....                           | 110 |
| 4.2   | Структура течения и теплообмен в трубе с внезапным расширением .....                                                                 | 122 |
| 4.2.1 | Описание экспериментального стенда для исследования отрывного пузырькового потока                                                    | 122 |
| 4.2.2 | Гидродинамика и теплообмен отрывного пузырькового потока .....                                                                       | 124 |
| 4.3   | Гидродинамика потока в кольцевом канале с частичным перекрытием сечения .....                                                        | 129 |
| 4.3.1 | Описание экспериментального стенда для исследования потока с блокадой .....                                                          | 129 |
| 4.3.2 | Локальная гидродинамика потока с блокадой .....                                                                                      | 130 |
| 4.4   | Исследование процессов при инъекции дисперсной фазы в тяжелый жидкометаллический теплоноситель .....                                 | 133 |
| 4.4.1 | Описание экспериментальных стендов .....                                                                                             | 133 |
| 4.4.2 | Описание методов и неопределенности измерений .....                                                                                  | 136 |

|       |                                                                                                                                 |     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4.3 | Результаты экспериментов .....                                                                                                  | 140 |
| 4.4.4 | Эксперименты с визуализацией движения пузырей в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе .....                                  | 141 |
| 4.5   | Динамические процессы, возникающие при импульсной инжекции газа в жидкость .....                                                | 144 |
| 4.5.1 | Описание экспериментального стенда .....                                                                                        | 144 |
| 4.5.2 | Методы и неопределенности измерений .....                                                                                       | 146 |
| 4.5.3 | Эволюция параметров теплоносителя при внезапной инжекции дисперсной фазы... ..                                                  | 146 |
| 4.6   | Гидродинамика и теплообмен крупного присоединенного пузыря.....                                                                 | 153 |
| 4.6.1 | Экспериментальный стенд для исследования потока с присоединенным пузырем ....                                                   | 153 |
| 4.6.2 | Гидродинамика и теплообмен потока под присоединенным пузырем .....                                                              | 154 |
| 4.7   | Выводы .....                                                                                                                    | 162 |
| 5     | Моделирование течений в элементах реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями .....                     | 163 |
| 5.1   | Смешение разнотемпературных потоков тяжелого жидкометаллического теплоносителя .....                                            | 163 |
| 5.1.1 | Схема и описание экспериментального стенда для изучения процессов в камерах смешения .....                                      | 163 |
| 5.1.2 | Описание эксперимента .....                                                                                                     | 164 |
| 5.1.3 | Измерение температуры .....                                                                                                     | 167 |
| 5.1.4 | Оценка неопределенности измерений .....                                                                                         | 168 |
| 5.1.5 | Оценка нестационарности эксперимента.....                                                                                       | 169 |
| 5.1.6 | Воспроизводимость эксперимента .....                                                                                            | 169 |
| 5.1.7 | Распределение температуры при неизотермическом течении в тройниковом смесителе с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем..... | 173 |
| 5.2   | Распределение температуры при течении тяжелого жидкометаллического теплоносителя в тепловыделяющей сборке.....                  | 176 |
| 5.2.1 | Экспериментальная модель тепловыделяющей сборки с ТЖМТ .....                                                                    | 176 |
| 5.2.2 | Процедура выполнения измерений .....                                                                                            | 182 |

|                                                  |                                                                                                                                                 |     |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2.3                                            | Методы измерений.....                                                                                                                           | 183 |
| 5.2.4                                            | Калибровка и неопределенности измерений расхода и температуры .....                                                                             | 185 |
| 5.2.5                                            | Распределение температуры при течении тяжелого жидкометаллического теплоносителя в тепловыделяющей сборке с неравномерным энерговыделением..... | 187 |
| 5.3                                              | Выводы .....                                                                                                                                    | 190 |
| Заключение .....                                 |                                                                                                                                                 | 191 |
| Список условных обозначений и сокращений .....   |                                                                                                                                                 | 193 |
| Список литературы .....                          |                                                                                                                                                 | 197 |
| Приложение А: Внедрение результатов работы ..... |                                                                                                                                                 | 234 |

## Введение

**Актуальность темы.** Будущее энергетики связано с развитием методов генерации тепловой и электрической энергии с минимальным потреблением горючих ископаемых и снижением выбросов парниковых газов. Одним из основных источников энергии, удовлетворяющих данным требованиям, является ядерная реакция. Однако несомненные преимущества атомной энергетики могут быть обесценены последствиями аварий, сопровождающихся выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду. Существенно повысить эффективность и безопасность работы ядерных энергетических установок могут оптимизация конструкций существующих энергоблоков атомных электростанций на тепловых нейтронах и создание реакторов нового типа на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями, замкнутым ядерным топливным циклом и естественной защитой.

Исследование интегральных и, что особенно важно, локальных термогидродинамических параметров работы элементов реакторных установок (РУ) с различными типами теплоносителей необходимо для улучшения эксплуатационных характеристик. Из-за сложности экспериментального исследования работы РУ в штатных и аварийных режимах течения теплоносителя моделируют на основе расчетов. Существующие в настоящее время системные теплогидравлические коды основаны на эмпирической информации и теоретических предположениях. Появляется возможность неверного предсказания из-за несовершенства моделей, эффектов нодализации и других факторов. Требуется их доработка и верификация с учетом последних достижений в области экспериментальной гидродинамики и теплообмена.

Для снижения гидравлического сопротивления, увеличения запаса до кризиса теплообмена и его интенсификации, повышенное внимание следует уделить локальным течениям в ячейках тепловыделяющих сборок (ТВС), влиянию диаметра и шага расположения твэлов, конструкции дистанционирующих элементов на локальные термогидродинамические характеристики.

Существенной проблемой является ограниченность базы данных о закономерностях теплофизических явлений при течении теплоносителя с малыми числами Прандтля. Возникает необходимость проведения пилотных работ по исследованию закономерностей гидродинамики и теплообмена тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ).

Для РУ с ТЖМТ важно рассмотрение задачи о гипотетической аварии, возникающей при разрыве теплообменных трубок парогенератора (ПГ), в связи с достаточно высокой вероятностью ее возникновения. Локальное повреждение теплообменной трубки второго

контура может привести к аварийным ситуациям, связанным с возможными скачками давления, кристаллизацией ТЖМТ, попаданию пузырей в ТВС и повышению реактивности и т.д. В связи с этим, необходимо определение закономерностей формирования и движения пузырей в ТЖМТ, гидродинамики присоединенных газовых пузырей, отрывных и нисходящих двухфазных потоков.

Для понимания физических механизмов особенностей локальных течений в элементах РУ и их влияния на интегральные параметры необходимо проведение исследований модельных объектов с относительно простой геометрией, но имеющих сложную структуру потока. Подобные данные необходимы для верификации и валидации различных методов расчетов, в том числе вычислительной гидродинамики (Computational fluid dynamics, CFD). Проблема тепловой перемежаемости, которая может привести к термоциклическому повреждению стенок оборудования в местах сочленений их элементов, достаточно подробно рассмотрена для водяного и воздушного теплоносителей на примере тройниковых соединений. Однако для ТЖМТ подобные данные отсутствуют, что затрудняет разработку теплогидравлических кодов и средств вычислительной гидродинамики, описывающих процессы, происходящие в РУ на быстрых нейтронах.

Таким образом, проведение экспериментальных исследований локальной гидродинамической структуры и теплообмена в элементах ядерных энергетических установок является актуальной научно-практической задачей. Подобные данные помогут более глубокому пониманию влияния дистанционирующих элементов на теплогидравлику ТВС при вариации геометрических параметров, закономерностей локальной гидродинамики и теплообмена двухфазных течений теплоносителя (в т.ч. ТЖМТ) в элементах реакторных установок, неізотермических течений ТЖМТ.

**Целью данной работы** является экспериментальное исследование локальной гидродинамической структуры, турбулентных характеристик и теплообмена одно- и двухфазных потоков водяного и тяжелого жидкометаллического теплоносителей в элементах ядерных энергетических установок для установления теплофизических закономерностей, обоснования проектных решений и верификации расчетных кодов, в том числе CFD методов.

**Задачами исследования** являлось:

- исследование локальной гидродинамической структуры (напряжения трения на стенке, скорости жидкости и пузырей, распределение пузырей газа) и теплообмена одно- и двухфазных потоков в экспериментальных моделях ТВС, с дистанционирующими и

перемешивающими решетками разных типов при вариации диаметра имитаторов ТВЭЛОВ, их количества, шага расположения, расхода теплоносителя;

- исследование локальных явлений, связанных с формированием двухфазных течений в элементах РУ, взаимодействию газовой фазы с теплоносителем, особенностей нисходящих и отрывных двухфазных течений, получение данных об отрывном диаметре пузырей, напряжении трения на стенке, скоростей дисперсной и несущей фаз, теплообмене и эволюции давления;
- проведение экспериментальных исследований и получение детальных данных по структуре температурного поля теплоносителя при неизотермических течениях ТЖМТ в соединениях трубопроводов и ячейках модели ТВС.

### **Научная новизна.**

На основе экспериментального моделирования течений теплоносителя в элементах реакторных установок определены закономерности локальных распределений осредненных и пульсационных значений скорости, напряжения трения, температуры и газосодержания.

Выполнено комплексное экспериментальное исследование одно- и двухфазных течений в моделях ТВС при широкой вариации конструкций дистанционирующих решеток (ДР), диаметра стержней-имитаторов ТВЭЛОВ, относительного расстояния между их осями, режима течения теплоносителя, установлены области возмущения потока за дистанционирующими решетками, впервые показаны особенности локальных гидродинамических параметров и распределения газовой фазы и теплообмена в этих областях.

Впервые выявлены и детально исследованы режимы течения нисходящего пузырькового потока с подавлением теплообменных процессов, показано, что связано с подавлением турбулентности и существенным изменением спектральных характеристик.

Впервые проведено экспериментальное исследование теплообмена отрывного пузырькового потока. Показано, что из-за формирования крупномасштабных вихревых структур в отрывной области потока, добавление пузырей оказывает слабое влияние на теплообмен, а в области восстановления течения интенсификация теплообмена в двухфазном потоке может достигать десятков процентов.

На примере Т-образного соединения трубопроводов впервые проведено экспериментальное исследование смешения разнотемпературных потоков, содержащего свинец тяжелого жидкометаллического теплоносителя. Получены данные о распределении осредненной и пульсационной температуры стенок канала и теплоносителя и их зависимости от расходов



потоков, выявлены наиболее подверженные термоциклическим воздействиям области стенок канала.

**Достоверность** результатов подтверждается:

- повторением измерений с сохранением начальных и граничных условий при проведении экспериментальных исследований;
- использованием надежных экспериментальных методов, проведением калибровочных процедур в канонических течениях;
- анализом неопределенностей эксперимента, сравнением полученных данных с известными зависимостями;
- кросс верификацией результатов разных методов измерений, «слепым» и прямым сравнением данных экспериментов и расчетов.

**Практическое значение работы.**

Полученные данные могут быть использованы при проектировании узлов новых поколений реакторных установок и обосновании конструкторских решений. Результаты исследования используются в Институте проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, ОАО ОКБ «Гидропресс», ОАО «ОКБМ Африкантов», для настройки и верификации расчетных кодов, описывающих типовые сценарии при штатных и аварийных условиях эксплуатации РУ: теплогидравлика ТВС, процессов, происходящих в камерах смешения, а также при возникновении межконтурной неплотности в реакторе с ТЖМТ. Результаты исследований двухфазных потоков используются для верификации расчетных моделей, предложенных в ИТ СО РАН, ИБРАЭ РАН, СФУ и других организациях.

**Положения, выносимые на защиту:**

- Результаты детальных экспериментальных исследований распределения осредненной и пульсационной скорости и локального газосодержания в ТВС, напряжения трения по периметру стержня-имитатора твэла и теплообмена одно- и двухфазного потока в моделях ТВС при изменении режима течения, диаметра имитаторов твэлов, относительного шага их расположения и количества;
- Экспериментальные данные о степени влияния дистанционирующих и перемешивающих решеток разных типов на локальные гидродинамические характеристики потока теплоносителя, теплообмен и гидравлическое сопротивление;
- Новые закономерности двухфазных течений, возникающих в элементах реакторных установок: данные о параметрах турбулентности, локальной гидродинамической структуре

нисходящего пузырькового потока при вариации дисперсного состава газовой фазы в режимах течения с интенсификацией и ухудшением теплообмена относительно однофазного потока; результаты исследований гидродинамики и теплообмена при отрыве и восстановлении пузырькового потока;

- Экспериментальное моделирование локальных течений при взаимодействии дисперсной фазы с ТЖМТ, новые данные о формировании течения, включающие скорости всплытия пузырей в расплаве ТЖМТ, экспериментальные данные об изменении давления и свободного уровня теплоносителя в канале при «взрывном» истечении газа высокого давления в ТЖМТ;

- Приоритетные результаты по распределению осреднённых и пульсационных значений температур в области смешения двух потоков ТЖМТ с разной температурой при изменении отношения расходов «горячего» и «холодного» теплоносителя.

**Личный вклад автора.** Основные научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, получены соискателем лично. Постановка задач данного исследования производилась как лично диссертантом, так и совместно с д.ф.-м.н. Кашинским О.Н. и член-корр. РАН Прибатуриным Н.А. Стенды для проведения исследований были созданы либо лично автором (стенд для изучения течения с внезапным расширением, стенд для исследования влияния диаметра твэлов и относительного шага на гидродинамику течения в ТВС), либо в составе научного коллектива (все остальные экспериментальные установки). Автор принимал непосредственное участие в создании и отладке методов измерений, применяемых в данном исследовании. Автором подготовлены экспериментальные стенды, проведены исследования, разработаны алгоритмы для обработки экспериментальных данных и произведены их анализ и интерпретация. Совместно с соавторами подготовлены публикации по результатам исследований, при этом вклад диссертанта был определяющим.

**Апробация результатов.** Результаты и материалы диссертационного исследования докладывались:

- на международных конференциях: International Conference on Multiphase Flow (2016 г., г. Флоренция, Италия, 2019 г., г. Рио де Жанейро, Бразилия), International Conference of Nuclear Engineering (2012 г., г. Анахайм, США, 2013 г., г. Чэнду, Китай, 2014 г., г. Прага, Чехия, 2018 г., г. Лондон, Великобритания), International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (2013 г., г. Пиза, Италия, 2017 г., г. Сиань, Китай), 16th International Heat Transfer Conference (2018 г., г. Пекин, Китай), THINS 2014 International Workshop (2014 г., г. Модена, Италия), ASME 2014 Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting FEDSM 2014 (2014 г., г. Чикаго,

США), Multiphase Flows - Simulation, Experiment and Application (2009, 2018, 2019 гг., г. Дрезден, Германия), International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17) (2017 г., г. Екатеринбург, РФ), 7th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (2010 г., г. Анталья, Турция), 6th International Symposium Turbulence, Heat and Mass Transfer (2009 г., г. Рим, Италия), 6th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion (2009 г., г. Сиань, Китай), Международной научно-практической конференции по атомной энергетике «Безопасность, эффективность, ресурс» (2017-2019 гг., г. Севастополь, РФ), Минский Международный форум по тепло- и массообмену (2008, 2012 гг., г. Минск, Республика Беларусь), Американо-Российском симпозиуме по гражданской ядерной энергетике (2013 г., г. Вашингтон, США);

– на российских конференциях: «Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей» (2005 г., г. Новосибирск, РФ), Российской национальной конференции по теплообмену (2006, 2010 гг., г. Москва, РФ), Межведомственном семинаре «Теплофизика 2008» (2008 г., г. Обнинск, РФ), Advanced Problems Mechanics (2009 г., г. Санкт-Петербург, РФ), МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (2009, 2011 гг., г. Подольск, РФ), Теплофизические основы энергетических технологий (2011 г., г. Томск, РФ), Динамика многофазных сред (2015 г., г. Новосибирск, РФ), Сибирском теплофизическом семинаре (2005, 2017-2019 гг., Новосибирск, РФ), Семинарах ОАО «ТВЭЛ» по улучшению эксплуатационных характеристик АЭС с ВВЭР (2007-2013 гг., г. Обнинск, РФ).

Исследования проводились в рамках индустриальных программ, проектов РФФИ, грантов Президента РФ для молодых кандидатов наук.

**Публикации:** по теме диссертации автором опубликовано 60 печатных работ, из них 22 – в ведущих реферируемых отечественных и зарубежных журналах из списка ВАК при Минобрнауки России (Журнал технической физики, Письма в ЖТФ, Теплофизика и Аэромеханика, Теплоэнергетика, ПМТФ, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Journal of Engineering Thermophysics, Nuclear Engineering and Design, Energies, Journal of Physics: Conference Series); 37 – в материалах международных и российских конференций и семинаров. Одна статья автора включена в монографию.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 237 страницах машинописного текста, содержит 11 таблиц, 144 рисунка и состоит из введения, пяти глав и заключения. Библиографический указатель содержит 403 источника.

## **1 Проблемы моделирования гидродинамики и теплообмена в элементах ядерных энергетических установок**

Разработка и лицензирование элементов ядерных энергетических установок (ЯЭУ) производится с помощью аттестованных расчетных теплогидравлических кодов. В зарубежной практике для проектирования реакторных установок, анализа режимов работы, исследования методов управления, в т.ч. сценариями аварийных ситуаций, вероятностного анализа безопасности, в целях лицензирования и других задач используются системные теплогидравлические коды улучшенной оценки (best estimate analysis, BE), такие как RELAP, ATHLET, CATHARE, TRAC и др. Для реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями применяются SAS4A/SASSYS-1, SIMMER-III(IV), ASTEC-Na и др. Для создания и заполнения матриц верификации развернуты масштабные экспериментальные работы, включающие исследования:

- на моделях для исследования фундаментальных зависимостей;
- установках для моделирования отдельных явлений;
- интегральных стендах;
- объектах ядерной энергетики.

На основе экспериментальных данных производится валидация новых моделей гидродинамики, теплообмена, турбулентности, а также замыкающих соотношений.

Использование кодов улучшенной оценки позволило снизить консерватизм при разработке РУ и улучшить эксплуатационные параметры. Однако для анализа безопасности более оправдано использование трехмерных кодов вычислительной гидродинамики или комбинированных подходов. Коммерческие CFD коды (STAR-CCM+, Ansys и др.) развиваются на протяжении последних десятилетий, однако их применение в атомной энергетике требует тщательного обоснования.

Можно выделить ряд особых экспериментальных работ – так называемые международные стандартные задачи (MC3), (International standard problem, ISP), проводимые, как правило, на интегральных стендах. MC3 направлены на верификацию и валидацию CFD методов для применения в атомной промышленности. Из последних циклов подобных работ можно выделить исследования смешения потоков в тройниковых смесителях [1, 2] которые были инициированы в связи с опасностью повреждения контуров теплообменного оборудования из-за флуктуаций температуры стенок при тепловом взаимодействии потоков теплоносителя. Другой пример (MATIS-h [3]) направлен на оптимизацию параметров течения теплоносителя в квадратной

сборке вертикальных стержней с дистанционирующей решеткой с перемешивающими элементами (дистанционирующая перемешивающая решетка, ДПР). В АО «ОКБМ Африкантов» проведена серия исследований, направленных на изучение связанных процессов гидродинамики и механики конструкций [4]. Для большинства подобных экспериментальных работ в открытых источниках предоставляется ограниченная информация, зачастую непригодная для проведения полноценной верификации расчетных кодов.

При нормальной и аварийной эксплуатации элементов РУ в связи с кипением теплоносителя, принудительной инжекцией дисперсной фазы или возникновении аварийных ситуаций, например, межконтурной неплотностью, может происходить формирование и движение двухфазных потоков (газ/пар - жидкость). Поэтому требуется развитие методов предсказания параметров таких потоков: интегральных теплогидравлических кодов, средств вычислительной гидродинамики многофазных потоков (Computational Multi-Fluid Dynamics, CMFD), методов прямого численного моделирования (Direct Numerical Simulation, DNS) и других. Для обоснования и настройки приведенных выше методов требуются надежные экспериментальные данные.

Для верификации и прохождения аттестации отечественными теплогидравлическими кодами (например, КОРСАР, СОКРАТ, HYDRA-IBRAE, и др.), методов CFD (ЛОГОС и др.) и прямого численного моделирования (CONV-3D), требуется проведение экспериментальных исследований, соответствующих приведенным ниже требованиям:

- применение надежных и высокоинформативных методов исследований локальных параметров потоков, проведение анализа неопределенности измерений;
- адаптация современных экспериментальных методов для исследуемых объектов;
- разбиение сложных явлений на более простые и подробное их исследование, изучение сопутствующих явлений.

Ниже приведен обзор литературы, посвященной параметрам, определяющим функционирование узлов реакторных установок: теплогидравлика ТВС, двухфазных потоков, камер смешения.

## **1.1 Теплогидравлика тепловыделяющих сборок реакторных установок.**

Основной частью РУ является активная зона, в которой располагаются ТВС, где происходит обмен теплом между топливными элементами (твэлами) и теплоносителем. Как правило, в качестве твэлов используется топливный столб, состоящий из урановых таблеток,

покрытых оболочкой, которая представляет собой цилиндрическую трубку. Топливные кассеты состоят из сотен твэлов. Для позиционирования твэлов могут применяться различные дистанционирующие элементы (дистанционирующие решетки, дистанционирующие перемешивающие решетки, проволоочная навивка (ПН)). Могут быть использованы интенсификаторы теплообмена, например, перемешивающие решетки (ПР). В основном, твэлы конфигурируются в треугольную (гексагональную) или квадратную компоновки и расположены в углах треугольников и квадратов, но могут быть и другие сборки, например, канадский тяжеловодный водо-водяной реактор (Canada Deuterium Uranium, CANDU). В большинстве действующих РУ в качестве теплоносителя используется вода.

Исследованию гидродинамики и теплообмена ТВС реакторных установок посвящено большое количество работ. Основные параметры проведенных экспериментальных исследований приведены в таблице 1. В первом столбце приводится фамилия первого автора и год публикации. Во втором столбце приведено сокращенное название теплоносителя: А – аргон, В – вода, В<sub>з</sub> – воздух, Г – гелий, Н – натрий, Р – ртуть, С – свинец. В третьем столбце показан диапазон чисел Рейнольдса. В четвертом столбце приведены геометрические характеристики канала. Сначала указаны количество стержней и тип упаковки (● – гексагональная, □ – квадратная). Далее приведены данные о дистанционирующих элементах ([–] – без ДЭ, [+]<sub>ДР</sub> – с ДР, ПН – проволоочная навивка, ДПР – дистанционирующая перемешивающая решетка). Далее, после знака ⊙ указан диаметр стержней в миллиметрах. В пятом столбце приведены данные об относительном шаге. В шестом столбце приведено краткое описание результатов экспериментов (КГС – коэффициент гидравлического сопротивления, РН – Рейнольдсовы напряжения, ТКЭ – турбулентная кинетическая энергия, ТО – теплообмен, Т – температура, Т' – пульсации температуры,  $u$  – скорость жидкости,  $u'$  – пульсации скорости жидкости,  $\tau$  – касательные напряжения). В седьмом столбце приведены данные о методах измерений, применявшихся в экспериментах (ЛДИС – лазерный доплеровский измеритель скорости, ЛИФ – лазерно-индуцированная флуоресценция, ОД – отборы давления, ТП – термопары, Particle Image Velocimetry, PIV – цифровая трассерная визуализация).

Наибольшее количество исследований проведено с использованием воды или воздуха в качестве модельного теплоносителя. Это связано с относительной простотой постановки подобных экспериментов и проведения визуальных наблюдений и измерений, основанных на оптических методах исследования гидродинамики течений теплоносителя.

Исследования структуры потоков в ТВС РУ производится в течение многих лет. В 60х годах прошлого столетия основное внимание было уделено исследованию интегральных

параметров: скорости теплоносителя, напряжению трения на стенке, температуры теплоносителя, определению коэффициентов трения, гидравлического сопротивления и теплообмена [5–14]. Применялись отборы давления, трубки Пито и Престона, термопарные измерения. Можно выделить работы, которые были проведены в ФЭИ, г. Обнинск [7–9, 13]. Были получены первые данные о локальной гидродинамике в условиях ТВС, предложены корреляции для расчета коэффициентов сопротивления и теплообмена.

В 70х годах прошлого столетия в КИТ, Германия, Карлсруэ был проведен большой цикл работ, посвященных изучению основных теплогидравлических параметров реакторных установок с гексагональной и квадратной компоновками [15–19]. Были выполнены исследования коэффициента сопротивления, скорости и турбулентных характеристик течения в твэльной сборке. На основе полученных данных, в частности, базируется эмпирическая корреляция для определения коэффициента гидравлического сопротивления дистанционирующих решеток, широко используемая в зарубежной практике.

Внедрение для исследования гидродинамики ТВС измерений с высоким временным разрешением: метод тонкопленочной анемометрии [19–42], лазерно-доплеровских измерителей скорости (ЛДИС [3, 43–57]), а в последние годы - цифровой трассерной визуализации [58–66], позволяет производить измерения в локальных областях потока, важных с точки зрения формирования местных возмущений течения, и наряду с осредненными параметрами течения получать компоненты пульсационной скорости течения теплоносителя, Рейнольдсовых напряжений, спектральных характеристик потока и т.д. Измерения в основном производились в масштабированных сборках стержней, т.е. при увеличении их диаметров и пропорциональному увеличению остальных элементов экспериментальных моделей, а также сборках с малым количеством имитаторов твэлов.

Производилось изучение параметров теплообмена в модельных ТВС и сбор данных для построения эмпирических корреляций, а также определения отличия таких потоков от канонических течений в гладкой трубе [67–69].

Наряду с исследованием параметров, которые могут быть в той или иной степени определены в канальном приближении, важным вопросом является межканальное взаимодействие и перемешивание. Данная проблема крайне важна в связи с вероятностью образования перегретых зон в областях с увеличенным энерговыделением. Это может привести к кризису теплообмена и аварийной ситуации, вплоть до разрушения твэлов. Исследованию подобных эффектов посвящены работы [11, 37, 70–72].

В последние годы исследования проводятся с помощью PIV. Для проведения исследований используются материалы экспериментальных моделей и рабочие жидкости, позволяющие избегать оптических искажений на границе модельный теплоноситель/твердое тело. Подобные исследования позволяют получать комплексную информацию о локальной гидродинамической структуре, включая данные об осредненных и пульсационных скоростях фаз, напряжениях Рейнольдса, спектральных характеристиках, межканального переноса и других данных.

Одновременно с эволюцией проведения исследований в гладких пучках твэлов, проводились исследования влияния дистанционирующих элементов на характеристики потока. Ранние работы были посвящены исследованию КГС дистанционирующих решеток, но с развитием экспериментальных методов появилась возможность получения экспериментальной информации о турбулентных характеристиках потока, теплообмене и перемешивании потока решетками [59, 73–75]. Последние работы, в основном, посвящены влиянию турбулизирующих элементов – дефлекторов на параметры течения модельного теплоносителя и проводятся с помощью различных, в том числе оптических методов исследования [76–79]. Дистанционирующие решетки для позиционирования твэлов, оказывают существенное влияние на локальные гидродинамические характеристики, распределение температуры и теплообмен потока теплоносителя. Коэффициент гидравлического сопротивления ТВС может существенно зависеть от типа и конструкции ДР. Для оптимизации работы РУ важную роль играет проведение исследований локальных параметров течения: скорость теплоносителя в ячейках, напряжение трения на стенке при вариации диаметра имитаторов твэлов и шага между ними [80–84].

Исследования напряжения трения на стенке производилось в большом количестве работ. В основном применялась трубка Престона. Для применения этого метода желательно производить масштабирование сборки и производить замену модельного теплоносителя на газ (обычно очищенный воздух). Использование трубки Престона не позволяет получать информацию о распределении пульсационных гидродинамических характеристик вблизи стенок твэлов – наиболее важной для теплообмена. Последние экспериментальные работы, например [63, 85, 86], подтверждают особую важность локальных гидродинамических характеристик в пристенной зоне потока. Поэтому является актуальным проведение исследования влияния диаметра и относительного шага между имитаторами твэлов на азимутальное распределение напряжения трения на стенке.

Изменения конструкции решеток: формы, толщины материала, высоты, шага расположения стержней, оказывают существенное влияние на термогидравлику потока в ТВС



[84, 87, 88]. На основе хорошо разрешающей в пространстве аппаратуры (ЛДИС и PIV методы) измерены профили осредненных и пульсационных скоростей потока в соседних ячейках модельных сборок стержней с использованием оптически прозрачной жидкости. Установлено, что влияние дистанционирующих решеток на закономерности межячейкового взаимодействия и теплообмен являются важными характеристиками в теплогидравлике ТВС.

В связи с разработкой реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями (ЖМТ) и замкнутым ядерным топливным циклом особенную ценность приобретают исследования гидродинамики и теплообмена таких потоков.

Исследование теплопередачи в каналах с жидкометаллическими теплоносителями были выполнены Кутателадзе, Боришанским [89–91], Мартинелли [92] и Лайоном [93] в середине 20-го века. Существует большой разброс в опубликованных экспериментальных данных вследствие проблем измерений температуры, скорости, расхода и других параметров течения таких теплоносителей. Немногочисленные работы посвящены изучению вынужденного течения жидкостей с низким числом Прандтля [94, 95], теплопередаче к сплаву свинец-висмут в трубах [96] или течению ТЖМТ в кольцевых каналах [97].

В рамках программ развития быстрых реакторов опубликованы экспериментальные результаты по теплообмену между пучками стержней в треугольной упаковке и жидким металлом. Работы отечественных [13, 98–100] и зарубежных исследователей [101, 102] охватывают широкий диапазон начальных рабочих параметров. В таблице 2 приведены основные параметры этих работ. Следует отметить, что большинство данных, перечисленных в таблице 2, выполнены 30–40 лет назад, и с тех пор не пополнялись. Причиной является выбор воды в качестве теплоносителя большинства современных РУ.

Приведенная база данных считалась достаточно обширной, полученные эмпирические корреляции удовлетворительно описывали параметры РУ с натриевым теплоносителем [103, 104]. Для быстрых реакторов, использующих свинец или сплав свинец – висмут в качестве теплоносителя, приведенной информации недостаточно. В этом контексте работы по течению свинцово содержащих теплоносителей в геометрии ТВС, максимально приближенных к проектируемым реакторным установкам, представляет ценные данные с точки зрения изменения температуры, скорости и плотности теплового потока. Большой цикл работ для изучения характеристик ТВС быстрых реакторов был выполнен в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» [105–107]. Для измерения коэффициентов межканального взаимодействия были разработаны тепловые и электромагнитные методы, метод фреоновго трассера, а также датчики для измерений температуры и расхода по высоте ТВС.

Таблица 1 – Экспериментальные исследования теплогидравлики реакторных установок.

| Источник                      | Т.н.  | Re, 10 <sup>3</sup> | Геом. параметры       | S/D            | Результаты эксперимента | Метод измерения                     |
|-------------------------------|-------|---------------------|-----------------------|----------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Субботин и др. 1961 [7]       | В, Р  | -                   | 7●, [+]               | -              | Т, ТО.                  | ТП                                  |
| Palmer и др. 1961 [6]         | Вз    | 10÷60               | 7●, [-]               | 1,015          | и, КГС, ТО              | ОД, тр. Пито, ТП                    |
| Ибрагимов и др. 1966 [9]      | ***   | 40                  | 3●, [-]               | 1,3            | и                       | Тр. Пито                            |
| Eifler, Nijssing 1967 [10]    | В     | 13÷54               | 4●, [-]               | 1-1,15         | и, КГС                  | ОД, тр. Пито                        |
| Левченко и др. 1967 [8]       | Вз    | 14÷93               | Канал, ∅104,2         | 1              | и, τ                    | тр. Пито, тр. Престона              |
| Nijssing R. [и др.] 1967 [11] | В     | 60                  | 4●, [-], ∅40          | 1,1            | Смешение                | Трассер (NaCl)                      |
| Tachibana et. al. 1969 [12]   | Вз    | 2÷10                | 7●, [-], ∅24 мм       | 1,125          | ТО                      | Измерение остаточной толщины пленки |
| Боришанский и др. 1969 [13]   | ЖМ    | 76÷90               | 7●, [-], ∅22          | 1,1, 1,3, 1,4  | ТО                      | ТП, калориметр                      |
| Van der Ros, 1970 [14]        | В     | 5÷30                | 10                    | 1,33           | ТО, смешение            | ТП, трассеры                        |
| Rehme 1972 [15]               | Вз,В  | 1÷700               | 7, 19, 37, 61●, [-]   | 1,05-2,37      | КГС                     | ОД                                  |
| Rehme 1973 [16]               | В     | 3÷200               | 25-169●, □, [+]       | 1,213<br>1,417 | КГС                     | ОД                                  |
| Maubach, Rehme 1973 [17]      | Вз, Г | 20÷300              | 19●, [-]<br>∅18       | 1,45           | КГС                     | ОД                                  |
| Marek и др. 1973 [18]         | Г     | 10÷300              | 9, 16□, [+] ∅17,4, 19 | 1,283          | КГС, ТО                 | ОД, ТП                              |

Продолжение таблицы 1

| Источник                   | Т.н. | Re, 10 <sup>3</sup> | Геом. параметры      | S/D            | Результаты эксперимента      | Метод измерения                         |
|----------------------------|------|---------------------|----------------------|----------------|------------------------------|-----------------------------------------|
| Rowe et. al. [43]          | В    | 50÷200              | 9□, [-], ∅25,4, 28,6 | 1,125 1,25     | u, u', автокорреляция        | ЛДИС                                    |
| Castellani и др. 1975 [70] | В    | 20÷70               | 3●, [ПН], ∅13,7      | 1,2            | Перемешивание                | Распространение радиоактивных маркеров  |
| Trupp и Azad 1975 [20]     | Вз   | 12÷84               | 7●, [-] ∅50,8        | 1,2, 1,35, 1,5 | КГС, τ, u, u', x, РН, спектр | Термоанемометр, тр. Пито, тр. Престона. |
| Carajilescov 1976 [44]     | В    | 27                  | 4●, [-]              | 1,123          | u, u', РН, ТКЭ.              | ЛДИС                                    |
| Dalle Donne 1977 [108]     | Г    | 12÷80               | 12●, ∅8              | 1,41           | КГС, ТО.                     | ТП, ОД                                  |
| Hudina 1977 [109]          | СО2  | 50÷200              | 31-37●, [+] ∅8,4     | 1,3            | КГС, ТО.                     | ТП, ОД                                  |
| Rehme 1978 [19]            | Вз   | 87                  | 4 в линию ∅157,5     | 1,071          | τ, u, u', ТКЭ                | Тр. Пито, тр. Престона, термоанемометр. |
| Dalle Donne 1979 [67]      | Г    | 1÷112               | 31-37●, [+], ∅8,4    | 1,41           | КГС, Т                       | ТП, ОД                                  |
| Seale 1979 [71]            | Вз   | 34÷299              | 3,4,5 в ряд          | 1,1 1,833      | Т, межканальный обмен        | Тр. Пито, комб. с ТП                    |
| Bartzis, Todreas 1979 [45] | В    | 9÷65                | 7●, [-]              | 1,124          | u, u', РН, ТКЭ.              | ЛДИС                                    |
| Chieng, Lin 1979 [46]      | В    | 189                 | 19С ∅19,05           | -              | u, u'                        | ЛДИС                                    |
| Fakory, Todreas 1979 [110] | Вз   | 4÷36                | 4●, [-], ∅38,1       | 1,1            | КГС, τ                       | Тр. Престона, ОД                        |
| Eichhorn и др. 1980 [21]   | В    | 12÷32               | 9□, [-], ∅25,4, 28,6 | 1,4            | КГС, τ                       | Термоанемометр на стенке                |

Продолжение таблицы 1

| Источник                  | Т.н. | Re, 10 <sup>3</sup> | Геом. параметры               | S/D            | Результаты эксперимента                   | Метод измерения                        |
|---------------------------|------|---------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|
| Grover, Venkat 1980 [111] | В    | 20÷80               | 7●, [+], ∅14,7                | 1,173-1,224    | КГС                                       | ОД                                     |
| Hooper 1980 [22]          | Вз   | 48                  | 6 □, ∅140.                    | 1,107-1,194    | КГС, τ, интенсивность турбулентности, РН. | Тр. Пито, Тр. Престона, термоанемометр |
| Rehme, Trippe 1980 [112]  | Вз,В | 2÷100               | 19●, [+]                      | 1,071<br>1,402 | КГС, u                                    | Тр. Пито, ОД                           |
| Rehme 1980 [23]           | Вз   | 60÷200              | 4 в ряд, [-], 100, 157,5,     | 1,07 1,4       | τ, интенсивность турбулентности, u.       | Тр. Пито, Тр. Престона, термоанемометр |
| Roidt и др. 1980 [72]     | Вз   | 73                  | 61 [ПН], ∅63,5                | 1,25           | КГС, u, смещение                          | ОД, тр. Пито                           |
| Hassan, Rehme 1981 [68]   | Вз   | 1÷200               | 3●, [+], ∅21,2                | 1,45           | Т, ТО                                     | ТП                                     |
| Seale 1982 [24]           | Вз   | 83÷346              | 2 стержня                     | 1,2            | КГС, τ, u, РН, ТКЭ                        | Тр. Пито, тр. Престона, термоанемометр |
| Hejna, Mantlík 1982 [113] | Вз   | 22÷30               | 19●, [-], ∅120                | 1,17           | КГС, τ, u                                 | Тр. Пито, тр. Престона, ОД             |
| Neti и др. 1983 [47]      | В    | 10÷40               | 9 □, [-], ∅19,05              | 1,4            | КГС, u, интенсивность турбулентности      | ЛДИС                                   |
| Hooper, Rehme 1984 [25]   | Вз   | 54÷105              | 4 в ряд ∅157,5, 6□, ∅140, [-] | 1,036<br>1,194 | τ, РН, интенсивность турбулентности       | Тр. Пито, тр. Престона, термоанемометр |

Продолжение таблицы 1

| Источник                          | Т.н. | Re, $10^3$ | Геом. параметры    | S/D            | Результаты эксперимента                       | Метод измерения                         |
|-----------------------------------|------|------------|--------------------|----------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Hooper, Wood 1984 [26]            | Вз   | 22÷207     | 6□, [-], ∅70       | 1,107          | τ, РН, u, спектр                              | ОД, тр. Престона, термоанемометр        |
| Renksizbulut и Hadaller 1986 [48] | В    | 500        | 6□, [-], ∅25,42    | 1,15           | τ, u, интенсивность турбулентности            | ЛДИС, тр. Престона                      |
| Жуков и др. 1986 [114]            | В,Вз | 6÷100      | 91 [ПН]            | 1-1,5          | КГС                                           | ОД                                      |
| Abdelghany и Eichhorn 1986 [27]   | Вз   | 79         | 3x6 □, [-], ∅50,8  | 1,3333         | τ, интенсивность турбулентности, КГС          | Термоанемометр, вмонтированный в стенку |
| Hudina, 1986 [69]                 | СО2  | 2÷193      | 37●, [+], ∅8,4     | 1,3 1,5        | КГС, распределение температуры                | ОД, ТП                                  |
| Rehme 1987 [28]                   | Вз   | 84         | 4 в ряд, [-], ∅139 | 1,045<br>1,252 | Интенсивность турбулентности, кросскорреляция | Тр. Пито, термоанемометр                |
| Rehme 1987 [29]                   | Вз   | 113        | 4 в ряд, [-], ∅139 | 1,148          | τ, u, интенсивность турбулентности, РН        | Тр. Пито, тр. Престона, термоанемометр  |
| Vonka 1988 [49]                   | СП   | 60÷175     | 4●, [-], ∅28       | 1,3            | u, завихренность                              | ЛДИС                                    |
| Rehme 1989 [30]                   | Вз   | 61÷119     | 4 в ряд, [-], ∅139 | 1,036 1,4      | τ, u, интенсивность турбулентности, РН        | Тр. Пито, тр. Престона, термоанемометр  |
| Sung-Ho 1989 [115]                | В    | 0,8÷50     | 7●, [-], ∅8,4      | 1,25 1,5       | ТО                                            | ТП                                      |

Продолжение таблицы 1

| Источник                   | Т.н. | Re, $10^3$ | Геом. параметры                   | S/D            | Результаты эксперимента                                  | Метод измерения                                  |
|----------------------------|------|------------|-----------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Möller 1991 [31]           | Вз   | 22÷105     | 4 в ряд, [-], $\odot 139$ , 157,5 | 1,007<br>1,224 | Интенсивность турбулентности, пульсации давления, спектр | Тр. Престона, Термоанемометр, микрофон           |
| Fen Shen и др. 1991 [50]   | В    | 14,2       | 16□, [ДПР], $\odot 6$             | 1,375          | u, u'                                                    | ЛДИС                                             |
| Ouma, Tavoularis 1991 [32] | Вз   | 74         | 5C, [-], $\odot 168$              | 1,14           | $\tau$ , u', энергетический бюджет                       | Термоанемометр,                                  |
| Ouma, Tavoularis 1991 [33] | Вз   | 48         | 5C, [-] $\odot 168$               | 1,15           | $\tau$ , u, u', энергетический бюджет                    | Тр. Престона, тр. Пито, термоанемометр,          |
| Yang и др. 1992 [51]       | В    | 60÷78      | 25□, $\odot 9,5$ , 10,8           | 1,312 1,35     | КГС, u, интенсивность турбулентности, перемеш.           | ЛДИС                                             |
| Guellouz, 1992 [116]       | Вз   |            | 5C, [-] $\odot 168$               | 1,15           | T, TO, спектр                                            | Термистор, термометр сопротивления               |
| Möller 1992 [34]           | Вз   | 61÷144     | 4 в ряд, [-], $\odot 139$ , 157,5 | 1,007<br>1,224 | $\tau$ , u, интенсивность турбулентности, спектр         | Тр. Пито, тр. Престона, термоанемометр, микрофон |
| Жуков и др. 1992 [117]     | С    | 1÷200      | ●                                 | 1 1,5          | КГС, TO                                                  | ОД, ТП                                           |
| Wu и Trupp 1993 [35]       | Вз   | 21÷55      | 1 ст., [-], $\odot 50,8$          | -              | Интенсивность турбулентности, ТКЭ, $\tau$                | Термоанемометр, тр. Престона                     |
| Mohanty и др. 1993 [118]   | Вз   | 0,9÷30     | 7●, [-], $\odot 12$ мм            | 1,3125         | КГС, TO                                                  | ТП, ОД                                           |
| Meyer 1994 [36]            | Вз   | 66÷71      | 37●, [-], 140 мм                  | 1,12           | Интенсивность турбулентности, ТКЭ, $\tau$ , T, T'        | Тр. Престона, термоанемометр, ТП                 |

Продолжение таблицы 1

| Источник                  | Т.н.   | Re, 10 <sup>3</sup> | Геом. параметры          | S/D       | Результаты эксперимента                             | Метод измерения                            |
|---------------------------|--------|---------------------|--------------------------|-----------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Wu и Trupp 1994 [37]      | Вз     | 52                  | 1 ст, [-], ⊙50,8         | -         | Смещение, спектр                                    | Термоанемометр                             |
| Wu 1995 [38]              | Вз     | 52                  | 1 ст., [-], ⊙50,8        | -         | τ, спектр                                           | Тр. Пито, тр. Престона, термоанемометр     |
| Yang и Chung 1996 [52]    | В      | 8÷100               | 25 □, [+], ⊙9,5          | 1,33 1,43 | КГС, η, интенсивность турбулентности, смещение      | ЛДИС, ОД                                   |
| Krauss и Meyer 1996 [39]  | Вз     | 65                  | 37 ●, [-], ⊙140          | 1,12      | Интенсивность турбулентности, ТКЭ, τ, Т, Т', спектр | Тр. Пито, тр. Престона, термоанемометр, ТП |
| Krauss и Meyer 1998 [40]  | Вз     | 65                  | 37 ●, [-], ⊙140          | 1,06 1,12 | Интенсивность турбулентности, ТКЭ, τ, Т, Т', спектр | Тр. Пито, тр. Престона, термоанемометр, ТП |
| Tamai и др. 2004 [119]    | В      | 20÷100              | 7, 20 ●, [+], ⊙13, 19,05 | 1,22 1,36 | КГС                                                 | ОД                                         |
| Silin и др. 2004 [120]    | В      | 10÷68               | 3 ●, [-]                 | 1,33      | Т, смещение                                         | Платиновые терморезисторы                  |
| Holloway и др. 2004 [73]  | В      | 28÷42               | 25 □, [+], ⊙9,5          | 1,33      | Т                                                   | ТП                                         |
| Shin и Chang 2005 [121]   | R13 4a | -                   | 4 □, [+], ⊙9,5           | 1,33      | Критический тепловой поток                          | ТП                                         |
| Holloway и др. 2005 [74]  | В      | 28÷42               | 25 □, [+], ⊙9,5          | 1,33      | ТО                                                  | ТП                                         |
| Kawahara и др. 2006 [122] | В      | 1,7÷24              | 4 ●, [-], ⊙12            | 1,083     | Смещение                                            | трассер                                    |

Продолжение таблицы 1

| Источник                   | Т.н.      | Re, 10 <sup>3</sup> | Геом. параметры | S/D       | Результаты эксперимента                               | Метод измерения                          |
|----------------------------|-----------|---------------------|-----------------|-----------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Tamai и др. 2006 [123]     | В         |                     | 37●, [+], ⊙13   | 1,077 1,1 | КГС                                                   | ОД                                       |
| Barrato и др. 2006 [41]    | Вз        | 42                  | 5С, [-], ⊙168   | 1,149     | Частоты, спектр                                       | термоанемометр                           |
| Silin и Juanicó 2006 [124] | В         | 14÷130              | 3●, [-], ⊙10    | 1,2       | Смещение                                              | Тепловой след, платиновые терморезисторы |
| Chang и др. 2008 [53]      | В         | 50                  | 25□, [+], ⊙25,4 | 1,3       | Скорость, завихренность, интенсивность турбулентности | ЛДИС                                     |
| Holloway и др. 2008 [75]   | Вз        | 29÷35               | 25□, [+], ⊙9,5  | 1,33      | ТО                                                    | ТП                                       |
| Shin и Chang 2009 [125]    | R<br>134a | -                   | 6□, [+], ⊙9,5   | 1,33      | Критический тепловой поток                            | ТП                                       |
| Caraghiaur и др. 2009 [54] | В         | 10÷50               | 24□, [+], ⊙9,62 | 1,32      | КГС, $\omega$ , интенсивность турбулентности          | ЛДИС, ОД                                 |
| Cheng и Yu 2009 [126]      | R12       | -                   | 7●, [-], ⊙9,5   | 1,147     | Т                                                     | ТП                                       |
| Нап и др. 2009 [55]        | В         | 50                  | 36 □, [+]       | ***       | $\omega$ , $\omega'$ , векторные поля                 | ЛДИС                                     |
| Ylönen и др. 2011 [127]    | В         | 8,8÷46              | 16□, [+], ⊙25   | 1,36      | Смещение                                              | Сетч. датч., солевой трассер             |
| Hosokawa и др. 2012 [58]   | В         | 12÷25               | 4 □, [-], ⊙20   | 1,25      | $\omega$ , $\omega'$ ,                                | PIV                                      |
| Dominguez 2012 [59]        | В         | 2÷16,3              | 25□, ДПР, ⊙9,5  | 1,326     | $\omega$ , $\omega'$ , РН                             | PIV                                      |
| Conner и др. 2013 [60]     | В         | 28                  | 25□, ДПР, ⊙9,5  | 1,326     | $\omega$ , $\omega'$ ,                                | PIV                                      |



Продолжение таблицы 1

| Источник                   | Т.н. | Re, 10 <sup>3</sup> | Геом. параметры  | S/D      | Результаты эксперимента       | Метод измерения                    |
|----------------------------|------|---------------------|------------------|----------|-------------------------------|------------------------------------|
| Moore и др. 2014           | В    | 2÷13                | 36□, ДПР, ∅9,5   | 1,35     | ТО                            | ТП                                 |
| Xiong и др. 2014 [56]      | В    | 6,6÷73              | 36□, ДПР, ∅9,5   | 1,326    | и, и`, РН                     | ЛДИС                               |
| Chang и др. 2014 [3]       | В    | 50                  | 25□, ДПР, ∅25,4  | 1,3      | и, и`, РН                     | ЛДИС                               |
| Hassan 2014 [61]           | В    | 23                  | 9□, ДПР, ∅10     | 1,28     | и, и`                         | PIV                                |
| Крапивцев и др. 2015 [128] | В    | 39÷63               | 19●, ДПР, ∅9,1   | 1,4      | КГС                           | ОД                                 |
| Дмитриев и др. 2015 [76]   | Вз   | —                   | 49□, ДПР         | —        | Смешение                      | Тр. Пито-Прандтля                  |
| Chang и др. 2016 [129]     | В, Н | 37,1                | 37●, ПН, ∅7,4, 8 | 1,13     | КГС, смешение                 | ОД, изо кинетическая проба         |
| Da и др. 2016 [130]        | В    | 2÷10                | 25□, ДПР, ∅9,5   | 1,326    | КГС, ТО                       | ТП, ОД                             |
| Lee и др. 2016 [131]       | В    | 10,4                | 16□, ДПР, ∅25,4  | 1,08     | ТО                            | ТП                                 |
| Wang и др. 2017 [132]      | В    | -                   | канал□           | -        | ТО                            | ТП                                 |
| Lomperski и др. 2017 [83]  | А,Вз | Без потока          | 19●, ПН, ∅6,3    | 1,36     | Т                             | Оптоволоконные датчики температуры |
| Nguyen 2017 [62]           | В    | 14                  | 25□, ДПР, ∅9,5   | 1,32     | и, и`, РН, спектр             | PIV                                |
| Bertocchi и др. 2018 [57]  | В    | 0,6÷30              | 2 пс, [-], ∅15   | 1,07 1,2 | и, и`, спектр                 | ЛДИС                               |
| Nguyen и др. 2018 [63]     | р-м  | 0,5÷6,3             | 61●, ПН, ∅15,9   | 1,189    | и, и`, РН, спектр, POD анализ | SPIV                               |

Продолжение таблицы 1

| Источник                   | Т.н. | Re, $10^3$ | Геом. параметры         | S/D   | Результаты эксперимента        | Метод измерения                 |
|----------------------------|------|------------|-------------------------|-------|--------------------------------|---------------------------------|
| Liu и Gu 2018 [82]         | В    | 2÷30       | 25□, ДПР, $\odot 10$    | 1,33  | ТО                             | ТП                              |
| Li и др. 2018 [64]         | В    | 10,4       | 25□, ДПР, $\odot 9,5$   | 1,32  | u, u', РН.                     | PIV                             |
| Don и Tavoularis 2018 [42] | Вз   | 50÷130     | 65С, $\odot 168,7$      | 1,149 | u, u', РН, спектр, турб. хар.  | Термоанемометр, тр.<br>Престона |
| Xiong и др. 2018 [65]      | В    | -          | 25□, ДПР, $\odot 9,5$   | 1,326 | Поля скорости, турб. хар.      | PIV                             |
| Byun и др. 2018 [80]       | В    | 30÷50      | 36□, ДПР, $\odot 15,88$ | 1,377 | ТО                             | ТП                              |
| Xing и др. 2019 [79]       | В    | 10,45      | 25 □ ДПР 9.5 мм         | 1,326 | Смещение                       | ЛИФ                             |
| Chen и др. 2019 [81]       | R13  | 41÷190     | 19●, ДПР, $\odot 9,5$   | 1,2   | ТО                             | ТП                              |
| Qi и др. 2019 [66]         | В    | 10,9       | 25□, ДПР, $\odot 9,5$   | 1,326 | u, u', РН., спектр, турб. хар. | PIV                             |

Проведены комплексные исследования межканального обмена массой и теплом в пучках гладких и оребренных твэлов, а также со спиральной проволочной навивкой. Измерен поперечный перенос массы в сборке стержней [105] при течении жидкометаллического теплоносителя, особенности теплообмена [106]. На основе этих измерений предложены формулы для коэффициентов взаимодействия между ячейками путем теплопроводности, турбулентной диффузии [107]. В качестве теплоносителя в этих исследованиях использовались натрий, натрий – калий, свинец-висмут. Были получены данные для расчета коэффициентов теплообмена на основе исследований пучков твэлов в диапазоне вариации основных параметров: шаг расположения стержней  $1,0 \leq s/d \leq 1,95$ ; число Пекле  $4 \leq Pe \leq 3500$ ; число Прандтля  $0,007 \leq Pr \leq 0,03$ .

Теплообмен в модельных сборках с квадратной компоновкой стержней и жидкометаллическим (натрий-калий) охлаждением исследован в [133]. Эксперименты производились при наличии ДР в потоке. Использовались имитаторы твэлов с диаметрами 12 и 15 мм, относительный шаг 1,34 и 1,25. Производились термопарные измерения во всех ячейках потока. С использованием электромагнитного метода производились измерения скорости теплоносителя [105]. Результаты были использованы для верификационных расчетов, выполненных специалистами из России (BRS-TVS.R), Испании (FLUENT), Нидерландов (STAR-CD), Южной Кореи (MATRA и CFX) и Японии (SPIRAL и AQUA). Получено удовлетворительное согласие расчета и эксперимента. Однако, локальные характеристики течения сильно расходятся, что особенно заметно для изменения скорости и обменных характеристик в районе местоположения ДР.

В работе [134] проведены экспериментальные исследования теплообмена в пучке стержней с винтовой проволочной навивкой. Сборка состояла из 37 стержней диаметром 16 мм и относительным шагом 1,33. На поверхностях модельных твэлов было размещено 12 встроенных микротермопар на различных расстояниях от области начала нагрева. Термопары были размещены в продольных пазах в стенке и установлены вдоль периметра имитатора твэла с интервалом  $30^\circ$ . Вращение имитатора твэла в диапазоне углов  $0 \div 360^\circ$  позволяло измерять распределение температуры поверхности. В качестве теплоносителя использовался эвтектический сплав калий-натрий, имеющий число Прандтля ( $Pr \sim 0,06$ ). Показано существенное ухудшение теплообмена на сборке с бифилярной спиральной проволочной навивкой типа "провод к проводу" в сравнении с пучком гладких твэлов. Это вызвано развитием тепловой неоднородности под проволокой, причем данный эффект увеличивается со снижением числа  $Pe$ .

Температурное поле в пучке стержней с дистанционирующей решеткой было исследовано в [134]. Геометрические характеристики стенда и модельный теплоноситель соответствовали

предыдущей работе. Для позиционирования стержней была применена ДР с шестигранной формой ячейки, толщина материала решетки 0,5 мм.

В работе отмечается, что ДР приводит к дополнительной турбулизации течения теплоносителя и интенсификации теплообмена. Это соответствует выводам ранее выполненных работ по исследованию влияния ДР на течение в ТВС водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР).

Исследование гидродинамических характеристик и процессов и тепло- и массопереноса в рабочих ТВС центральной и периферийной подзон активной зоны РУ БРЕСТ-ОД-300 проведено в [135]. Экспериментальная установка включает в себя имитатор хвостовика ТВС, пучок 37 стержней-имитаторов твэлов. Диаметр стержней 20,81 мм, относительный шаг 1,33. Рабочей средой в установке является воздух. Приведены данные о распределении продольной компоненты скорости потока и температуры «теплового следа» по высоте макета ТВС.

В работах [136, 137] содержатся результаты комплексного исследования теплообмена при течении жидкого металла в 19-ти стержневой сборке стержней гексагональной упаковки. Эксперименты выполнялись с использованием эвтектического сплава свинец – висмут. Диаметр стержней – имитаторов твэла 8,2 мм, их длина 1272 мм,  $S/D = 1,4$ . ДР была изготовлена из нержавеющей стали, высота решетки 25 мм. В торцы решетки были встроены термопары с диаметром спая 0,25 мм. Сборка стержней включала 3 ДР. Расход теплоносителя был в диапазоне  $1 \div 10 \text{ м}^3/\text{ч}$  (расходная скорость до 2 м/сек), подводимая ко всем 19 стержням мощность  $50 \div 426 \text{ кВт}$ , температура теплоносителя на входе составляла 200 °С или 300 °С.

Тепловые измерения были направлены на установление закономерностей теплообмена от гладких стержней к жидкому металлу. Влияние ДР на теплообмен в данных работах не изучалось. Были выполнены пре- и постестовые расчеты перепадов давления и параметров теплообмена в рабочем участке. Используются современные модели турбулентности и численные методы. Эксперименты показали хорошую повторяемость. Для невысоких скоростей потока наблюдается хорошее согласие с результатами моделирования теплопередачи, основанными на постоянстве турбулентного числа Прандтля. Приводимый анализ данных по гидравлике указывает на соответствие гидродинамических параметров течения жидкого металла в сборке стержней с соответствующим течением водяного теплоносителя. В выводах работы отмечается, что доступная база данных по теплообмену к свинец-содержащим теплоносителям устарела, поскольку эксперименты были выполнены более чем 40 лет назад и основывались в основном на щелочно-металлических и ртутных системах.

Таблица 2 – Сводка данных экспериментов

| Год  | Ссылка | Жидкость          | Кол-во стержней | S/D  | Pr      |        | Re×10 <sup>-3</sup> |       | Pe   |       | Q <sub>w</sub> , кВт·м <sup>-2</sup> |       | T, °C |       |
|------|--------|-------------------|-----------------|------|---------|--------|---------------------|-------|------|-------|--------------------------------------|-------|-------|-------|
|      |        |                   |                 |      | Мин.    | Макс.  | Мин.                | Макс. | Мин. | Макс. | Мин.                                 | Макс. | Мин.  | Макс. |
| 1961 | [138]  | Hg                | 19              | 1.38 | 0.016   | 0.021  | 8,0                 | 80    | 190  | 1700  | 45                                   | 45    | 49    | 127   |
| 1961 | [138]  | Hg                | 13 (19)         | 1.75 | 0.0227  | 0.0227 | 25                  | 175   | 800  | 4000  | ~120                                 |       | ~38   |       |
| 1963 | [99]   | Na                | 7               | 1.20 | 0.0057  | 0.0072 | 3,8                 | 57    | 30   | 345   | 58                                   | 116   | 210   | 310   |
| 1964 | [100]  | Na                | 7               | 1.50 | ~0.0064 |        | 4,3                 | 28    | 28   | 172   | 58                                   | 116   | 220   | 270   |
| 1964 | [139]  | Hg                | 13              | 1.75 | ~0.02   |        | 7,5                 | 200   | 150  | 4000  | 80                                   | 120   | ~38   |       |
| 1964 | [139]  | Hg                | 13              | 1.75 | n.a.    | n.a.   | n.a.                | n.a.  | 150  | 4000  | 80                                   | 120   | ~38   |       |
| 1967 | [140]  | NaK <sup>*1</sup> | 19              | 1.75 | 0.013   | 0.021  | 12                  | 92    | 250  | 1200  | n.a.                                 | n.a.  | n.a.  | n.a.  |
| 1967 | [141]  | Hg                | 7               | 1.10 | ~0.024  |        | 6,2                 | 62    | 150  | 1500  | n.a.                                 | n.a.  | n.a.  | n.a.  |
| 1967 | [141]  | Hg                | 7               | 1.20 | ~0.024  |        | 12,5                | 62    | 300  | 1500  | n.a.                                 | n.a.  | n.a.  | n.a.  |
| 1967 | [141]  | Hg                | 7               | 1.30 | ~0.024  |        | 12,5                | 125   | 300  | 3000  | n.a.                                 | n.a.  | n.a.  | n.a.  |
| 1967 | [141]  | Hg                | 7               | 1.40 | ~0.024  |        | 12,5                | 83    | 300  | 2000  | n.a.                                 | n.a.  | n.a.  | n.a.  |
| 1967 | [141]  | Hg                | 7               | 1.50 | ~0.024  |        | 12,5                | 125   | 300  | 3000  | n.a.                                 | n.a.  | n.a.  | n.a.  |

Продолжение таблицы 2

| Год  | Ссылка | Жидкость          | Кол-во стержней | S/D  | Pr     |        | Re $\times 10^{-3}$ |       | Pe   |       | Q <sub>w</sub> , кВт·м <sup>-2</sup> |       | T, °C |       |
|------|--------|-------------------|-----------------|------|--------|--------|---------------------|-------|------|-------|--------------------------------------|-------|-------|-------|
|      |        |                   |                 |      | Мин.   | Макс.  | Мин.                | Макс. | Мин. | Макс. | Мин.                                 | Макс. | Мин.  | Макс. |
| 1969 | [142]  | Hg                | 13              | 1,75 | 0,019  | 0,022  | 29                  | 175   | 550  | 3800  | 48                                   | 97    | ~38   |       |
| 1969 | [13]   | Na                | 7               | 1,40 | ~0,007 |        | 13,6                | 47,2  | 95   | 330   | 81                                   | 166   | 200   | 225   |
| 1969 | [13]   | n.a.              | 7               | 1,10 | ~0,03  |        | 10,6                | 65    | 320  | 1950  | 81                                   | 139   | 207   | 220   |
| 1969 | [13]   | n.a.              | 7               | 1,30 | ~0,03  |        | 11,6                | 73,5  | 350  | 2200  | 75                                   | 93    | 206   | 222   |
| 1969 | [13]   | n.a.              | 7               | 1,40 | ~0,03  |        | 15,3                | 58,2  | 460  | 1780  | 93                                   | 151   | 208   | 230   |
| 1971 | [143]  | Na                | 37              | 1,1  | 0,007  | 0,007  | n.a.                | n.a.  |      | n.a.  | n.a.                                 | n.a.  | n.a.  | n.a.  |
| 1972 | [144]  | NaK <sup>*2</sup> | 31 (37)         | 1,25 | 0,014  | 0,024  | 5,69                | 128   | 106  | 2700  | ~100                                 |       | 100   | 220   |
| 1972 | [144]  | NaK <sup>*2</sup> | 31 (37)         | 1,60 | 0,009  | 0,020  | 9,95                | 284   | 141  | 4300  | ~100                                 |       | 137   | 382   |
| 1972 | [144]  | NaK <sup>*2</sup> | 31 (37)         | 1,95 | 0,008  | 0,023  | 15,3                | 258   | 140  | 4300  | ~100                                 |       | 105   | 425   |
| 2013 | [145]  | LBE               | 19              | 1,40 | 0,0184 | 0,0344 | 10,2                | 128   | 291  | 3060  | 118                                  | 1033  | 202   | 433   |

Экспериментальные результаты по течению ртути в кольцевом канале приведены в [146], прямое численное моделирование в [147, 148], расчетно-экспериментальное исследование в [149]. Детальные выводы из полученных корреляций по теплообмену при вынужденном течении ТЖМТ в концентрических кольцевых каналах можно найти в [150–152].

Результаты экспериментов на установке для исследования турбулентного потока свинец-висмут в кольцевом вертикальном канале с концентрическим одиночным нагреваемым стержнем, приведены в [153]. Использовался эвтектический сплав свинец – висмут. Представлены новые экспериментальные результаты измерений радиального и осевого распределения температуры в турбулентном потоке вокруг нагретого стержня, сравнение результатов с CFD расчетами. Получена новая корреляция для термически развитого потока в жидкостях с низкими числами Прандтля и детальное описание особенностей влияния сил плавучести в эвтектическом сплаве свинец-висмут. Исследованные числа Рейнольдса охватывают диапазон от  $Re=1,48 \times 10^4$  до  $Re=2,37 \times 10^5$ . Несмотря на недостатки инструментария, особенно для пристеночных измерений скоростей, было получено разумное согласование между расчетом и экспериментальными измерениями.

## 1.2 Гидродинамика и теплообмен двухфазных потоков

Движение двухфазных потоков в элементах РУ встречается в штатных и аварийных ситуациях при кипении теплоносителя, повторной заливке ТВС, введении дисперсной фазы в технологических целях и других процессах. Изучение проблемы межконтурной неплотности ПГ важно из-за достаточно высокой вероятности ее возникновения. При аварии с разрывом теплообменных трубок парогенератора РУ с ТЖМТ (БРЕСТ-ОД-300), водяной пар под высоким давлением поступит в нисходящий поток свинцового теплоносителя. При малой течи, в зависимости от размера повреждения могут быть реализованы различные режимы течения (пузырьковый, снарядный, дисперсно-кольцевой и т.д.). При «гильотинном» разрыве трубки произойдет импульсное истечение водяного пара в теплоноситель. Возможно попадание пузырей пара в главный циркулирующий насос и тепловыделяющую сборку.

В связи с этим необходимо проведение исследований отрыва и движения фрагментов дисперсной фазы в расплаве жидкого металла, локальных характеристик двухфазных потоков, теплообмена. Оценка происходящих процессов может быть выполнена с помощью системных теплогидравлических кодов, основанных, в основном, на двухжидкостном приближении. Одним из основных кодов, разрабатываемых в РФ, является HYDRA-IBRAE, или его модификация для

РУ с жидкометаллическими теплоносителями - HYDRA-IBRAE/LM [154]. В последние годы наряду с подходами вычислительной гидродинамики активно разрабатываются методы гидродинамики многофазных потоков (Multiphase Computational Fluid Dynamics, MCFD). Наиболее точные методы расчета: прямое численное моделирование и метод крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES) - имеют значительную вычислительную стоимость. В настоящее время методы прямого численного вычисления позволяют учитывать ограниченное количество пузырей, одновременно находящихся в потоке (десятки и сотни), что существенно отличается от реальных масштабов. Для разработки и тестирования менее требовательных к системным ресурсам компьютеров моделей, например, осредненных по числу Рейнольдса уравнений Навье-Стокса (Reynolds averaged Navier Stokes, RANS), требуется экспериментальная информация, уточняющая замыкающие соотношения.

Наибольшее число работ по гидродинамике пузырьковых потоков посвящено исследованиям восходящих течений в вертикальных трубах. На структуру и теплообмен таких течений, даже в нереагирующих течениях и при отсутствии фазовых переходов, могут оказывать влияние следующие определяющие факторы:

- расход жидкости и газа/пара;
- режим течения (ламинарный, переходный, турбулентный);
- модификация турбулентности (интенсификация и подавление);
- размер дисперсных включений (пузырей);
- геометрия стенов и промышленных аппаратов;
- направление течения (восходящее, горизонтальное, наклонное, нисходящее);
- процессы дробления и коалесценции пузырей;
- наличие отрывных областей и т.д.

Может происходить миграция дисперсной фазы в поперечном сечении потока, что приводит к перестройке локальной гидродинамической структуры течения несущей фазы и изменению параметров теплообмена. Возникают дополнительные требования к результатам экспериментальных исследований. Например, приведение данных только о среднем диаметре пузырей в потоке не является достаточным для успешной верификации расчетных кодов, т.к. развиваются подходы, аналогичные уравнениям баланса популяций (Population balance equations, PBEs). Необходимо представление информации о распределении размеров пузырей в потоке. Подобные данные могут быть получены с помощью различных современных методов (многоконтактные резистивные датчики, сетчатые датчики и др.). Для потоков с относительно малыми газосодержаниями наиболее актуальным является применение современных методов



машинного видения к изображениям потока (теневая съемка, лазерно-индуцированная флуоресценция, PIV, PFBI). Количество работ, в которых рассматривается теплообмен пузырьковых потоков, ограничено для любых условий и режимов течения. Нехватка подобных данных часто обсуждается на крупнейших международных форумах (например, International Conference on Multiphase Flow 2016, 2019 и др.).

### **1.2.1 Формирование и эволюция пузырей газа в теплоносителях реакторных установок**

Диспергирование газовых пузырей в жидкость является основой ряда технологий, используемых в химической промышленности и металлургии. Этот процесс является простым и эффективным способом получения развитой межфазной поверхности. Большое количество работ посвящено исследованию истечения газа в объем неподвижной жидкости. Исследование процессов инъекции легкой фазы в объем или поток жидкой фазы довольно подробно рассмотрено для классических жидкостей (вода, спирт, глицерин и др.). В основном рассматривается подача газа через одиночное сопло или отверстие. Существует три основных режима формирования пузырей: квазистатический, динамический и струйный.

Для численного моделирования применяют методы отслеживания межфазной границы (front tracking method, FTM) или объема жидкости (volume of fluid method, VOF). Предложены различные аналитические модели процесса отрыва пузырей [155]. В идеализированных моделях предполагается, что пузырек в процессе отрыва сохраняет сферическую форму в начальной стадии формирования. Такие модели называются сферическими. Модели, учитывающие реальную форму пузырей при отрыве, называются несферическими. По предположениям о процессе формирования пузырей можно выделить одностадийные, двухстадийные и трехстадийные модели. Однако ряд вопросов до сих пор открыт, в частности, наиболее адекватные модели основаны на эмпирических данных.

На отрывной диаметр пузыря оказывают влияние много факторов: физические свойства жидкости и газа, параметры стенда. Роль каждого из них определяется режимом отрыва пузырей. Влияние диаметра отверстия истечения может меняться от слабого в квазистатическом и струйном режимах, до существенного в динамическом режиме. Объем камеры истечения является определяющим параметром для граничных условий при формировании пузырей (постоянного расхода при малом и постоянного давления при большом объеме). Вязкость жидкости практически не влияет на процесс генерации пузырей при малых  $Q_r$ . При больших  $Q_r$  и высокой вязкости жидкости объем пузыря может увеличиваться из-за задержки пузыря у

отверстия, вызванной силой сопротивления. Влияние плотности рабочей жидкости на процесс формирования пузырей рассмотрено в [156]. При малых  $Q_r$  большое влияние на отрывной диаметр пузыря оказывает поверхностное натяжение, однако при увеличении расхода газа оно ослабевает.

Для создания перспективных ядерных энергетических установок с жидкометаллическими теплоносителями актуальны исследования барботажа газа через жидкий металл (предотвращение окисления теплоносителя, создание газлифтных насосов и др.). Для получения высококачественной стали производится барботаж пузырей аргона через расплав. Барботажные системы газ/жидкий металл также могут применяться для пиролиза метана [157]. Для подобных процессов требуется исследование площади межфазной поверхности и скорости пузырей. Проводятся экспериментальные и теоретические исследования характеристик отрыва [155] и движения газовых пузырей в жидких металлах [158–160]. Проведено экспериментальное моделирование межконтурной неплотности при повреждении теплообменных трубок в парогенераторе реакторной установки [161–164].

Исследования в жидких металлах затруднены из-за оптической непрозрачности. Для проведения измерений используются электроконтактный, магнитный, ультразвуковой методы, а также просвечивание с помощью рентгена. Исследования в свинце и его сплавах затруднены из-за высокой температуры и слабой проницаемости для рентгеновского излучения. В основном, эксперименты в среде расплава свинца или свинца-висмута производятся с помощью резистивных датчиков, в том числе с несколькими контактами [165, 166]. В [167] предложен оригинальный бесконтактный метод измерения скорости всплытия пузырей в жидком металле, однако проведение экспериментальных исследований затруднено.

Исследования взаимодействия «воздух-вода» и «воздух-глицерин» для изучения теплообмена и динамики одиночных пузырей в застойном бассейне выполнены в [168]. Получены данные о скоростях одиночных пузырей в бассейнах и в вязких линейных сдвиговых потоках.

В экспериментах [169] использовались Сплав Ньютона при  $100 \div 110^\circ\text{C}$  и вода при  $20^\circ\text{C}$ . Изучена стационарная тепловая стратификация расплава и характеристики двухфазного потока, а также коэффициент сопротивления одиночного пузыря в расплаве и скорость его роста.

В экспериментах [170] использован сплав Вуда при температуре  $\sim 170^\circ\text{C}$  и вода при температуре  $300^\circ\text{C}$  и давлении  $4,5 \div 8,5$  атм. Исследовано влияние турбулентности на межфазный теплообмен вода – расплав и получена скорость испарения капель воды при различных числах

Рейнольдса. Эксперименты выполнялись применительно к опреснительным установкам, что обусловило выбор параметров экспериментов.

Результаты экспериментов в бассейне расплава свинец – висмут Pb-Bi при температурах  $480\div 530^{\circ}\text{C}$  и воде при  $25\div 90^{\circ}\text{C}$  представлены в [171]. Изучалось взаимодействие капель воды с расплавом, скорость впрыска капель составляла  $5,8\div 7,8$  м/с при вертикальном падении воды в расплав эвтектики. Описана динамика проникновения водяной струи в бассейн Pb-Bi, приводится математическая модель процесса взаимодействия струи воды с расплавом.

В [172] приведен анализ переноса парового пузыря от парогенератора в активную зону реактора ELSY в случае малой течи на основе петлевых экспериментов со сплавом Pb-Bi с принудительной циркуляцией сплава со скоростью 0,239 м/с, температурой  $335^{\circ}\text{C}$  и расходом 4,77 кг/с и естественной циркуляцией при скорости 0,042 м/с, температуре сплава 695 К и расходе 0,83 кг/с. Приводятся параметры и динамика пароводяных пузырей в свинце-висмуте, но экспериментальных данных не достаточно для практического применения.

В экспериментальной установке UW-Madison [173, 174] осуществлялся впрыск воды в бассейн расплавленных материалов для изучения условий прямоконтактного теплообмена ЖМТ-вода и «парового лифта». Параметры реагентов: вода, у которой температура недогрева до температуры насыщения составляла примерно  $10^{\circ}\text{C}$ ; свинец (или сплав Pb-Bi) с температурой  $500^{\circ}\text{C}$ , давлением  $1\div 10$  атм., расход воды изменялся в диапазоне от 1,5 до 8 г/с. Для регистрации процессов межфазного взаимодействия использовалось рентгеновское излучение. При различных расходах воды и давлениях в системе получены:

- зависимости объемного коэффициента теплообмена;
- колебания свободной поверхности ЖМТ;
- время формирования пузыря;
- скорости всплытия пузырей.

В экспериментах [175] изучалось всплытие пузырей азота с расходом  $0,13\div 0,4$  мл/мин в вертикальной трубе, заполненной эвтектическим расплавом свинец-висмут. Получены данные о распределении газосодержания, длинах пузырей и скорости их всплытия. Как и в предыдущих случаях, перепад давления теплоноситель – водяной бак очень мал, а данные могут быть применены только для условий «микротечи».

Среди крупномасштабных экспериментов, посвященных моделированию взаимодействия свинец-вода или свинец - пароводяная смесь, можно отметить детальное исследование

локальных и интегральных процессов при межконтурной неплотности ПГ [176]. С использованием электроконтактного метода и микротермопреобразователей исследован отрыв пузырей от отверстий истечения и структура двухфазного течения. Фиксировалось состояние свободной поверхности теплоносителя. В качестве лёгкой фазы, движущейся через слой свинцового или свинцово-висмутового теплоносителя различной высоты, использовались пар воды с различной влажностью, инертные газы. Диапазон диаметров отверстий истечения составлял  $0,5 \div 10$  мм, перепад давления изменялся от 1,0 до  $240 \text{ кг/см}^2$ . Температура жидкого металла изменялась в диапазоне  $350 \div 600$  °С, а легкой фазы составляла  $200 \div 300$  °С.

Результатом этих работ является качественное описание динамики пузырей при пузырьковом и струйном истечении, особенности перехода между этими режимами. Однако, несмотря на широту исследований, существенными недостатками экспериментов является недостаточная инструментальная информативность, не позволяющая в полной мере применить полученные данные к валидации расчетных кодов.

Экспериментальные исследования [177] направлены на обоснование безопасности РУ БРЕСТ-ОД-300 при разгерметизации теплообменных труб парогенератора. Рабочий участок стенда был выполнен в виде вертикальной трубы диаметром 100 мм и длиной до 1500 мм, где находился свинец при температуре 520 °С и атмосферном давлении. Внутри рабочего участка устанавливались трубки диаметром 18 мм и толщиной стенки 2,5 мм, имитирующие трубки парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300. В одну из них подавался водяной пар/инертный газ с давлением до 18 МПа. Разрыв трубки выполнялся с использованием концентратора на внешней боковой поверхности трубки. Форма паровой/газовой полости после разрыва трубки фиксировалась рентгеновской съемкой. Давление пароводяной смеси в трубке в этом случае изменялось в двух диапазонах: до 0,4 МПа и выше 3 МПа. В первом случае исследовалось истечение при малых давлениях с целью определения наступления режима истечения одиночных пузырей. Минимальное значение давления в трубке, при котором зарегистрировано истечение пароводяной смеси в жидкий свинец, составило 0,15 МПа. Однако даже в этом случае не удалось зафиксировать отрывной диаметр пузыря, а образующиеся в потоке пузыри имели характерный размер  $10 \div 30$  мм, зависящий от давления пара в трубке. Во втором случае исследовалось струйное истечение и фиксировалось изменение давления в рабочем участке. Обнаружено, что в этом случае происходит образование больших полостей пара в свинце с неупорядоченной поверхностью. Свинец при этом вытесняется вверх рабочего участка по принципу «поршня».

Что касается измерений давления в канале при разгерметизации трубки с паром, то было зафиксировано существенное возрастание давления в свинце, превышающее давление пара в

трубке и затем ниспадающее с течением времени. Максимум давления приходился на стадию формирования истечения при внезапном разрыве трубки и соответствовал масштабу времени порядка  $1 \div 1,5$  микросекунд.

Изучению динамических явлений при межфазном взаимодействии ТЖМТ – газ/пар посвящены работы, выполненные на установке LIFUS5 в центре ENEA, Бразимоне с поддержкой численного моделирования в Пизанском университете. С точки зрения практического применения к верификации и валидации расчетных кодов наиболее интересна серия экспериментов [178–180], в которых вода под давлением  $\sim 185$  атм. при температуре  $300^\circ\text{C}$  инжестировалась в бассейн 80 л. расплава эвтектического сплава свинец-висмут с температурой  $400^\circ\text{C}$  при атмосферном давлении. В экспериментах была предусмотрена верхняя газовая подушка объемом 20 литров, заполненная аргоном.

Результаты эксперимента показали острый пик давления, генерируемый вследствие воздействия струи испаряющейся воды на расплав, и последующее повышение давления в сосуде с расплавом до 2,4 МПа. Эта величина достигнута примерно через 0,5 с от начала инжестии воды. В процессе испытаний наблюдались колебания давления в течение  $\sim 0,1$  с в расплаве и в течение  $\sim 0,5$  с в газовом объеме. Около 120 кг расплава было выброшено в газовую подушку вместе с пароводяной смесью. Наибольшее снижение температуры расплава (до  $\sim 150^\circ\text{C}$ ) наблюдалось вблизи форсунки инжестии воды.

### **1.2.2 Структура течения вблизи присоединенных пузырей**

Ввод дисперсной фазы в нисходящий поток жидкости может приводить к образованию присоединенных пузырей, которые занимают значительную часть поперечного сечения канала, что приводит к существенному росту гидравлического сопротивления [181]. Аналогия между подобными присоединенными пузырями и снарядным режимом течения приведена в [182].

Снарядное течение встречается в нефтяных и газовых скважинах, газожидкостных трубопроводных реакторах, химическом машиностроении и фармацевтической промышленности. В потоке газовые снаряды (пузыри Тейлора) чередуются с жидкостными пробками, в которых могут находиться мелкие пузырьки газа. Часть потока, которая содержит пузырь Тейлора и следующую за ним жидкую пробку, называется «элементарной ячейкой» снарядного течения.

Ранние исследования снарядного течения были посвящены, главным образом, изучению характеристик газовой фазы (длина и частота прохождения пузырей, их скорость). Скорость

движения пузырей Тейлора в стационарной жидкости может быть определена с использованием формулы [183–185]:

$$U_0 = C_1(gD)^{0,5} \quad (1),$$

где  $C_1$  - коэффициент,  $g$  - ускорение свободного падения,  $D$  - внутренний диаметр трубы. В различных экспериментальных и теоретических исследованиях показано, что значения  $C_1$  варьируются от 0,328 до 0,36 [183, 184, 186–188] и другие. Представлены универсальные корреляции, в которых используются вязкие, инерционные, гравитационные и межфазные силы, которые влияют на скорость газовых снарядов [189], [190]. Для определения скорости движения пузырей Тейлора в потоке жидкости была предложена формула [191]:

$$U_{\Pi} = C_0 V_{гж} + C_1(gD)^{0,5} \quad (2),$$

где  $V_{гж}$  - сумма скоростей жидкой и газовой фаз. Значения коэффициента  $C_0$  составляет 1,2 для восходящего турбулентного потока [191, 192] и др. Для ламинарного потока  $C_0$  равно 2.

Формулы 1 и 2 дают хорошие результаты в установившихся потоках, при постоянном расстоянии между пузырями. Однако было показано, что на скорости движения пузырей Тейлора влияют длины жидких пробок. Это связано с взаимодействием между следом за «ведущим» пузырем и носовой частью преследующего.

Перепад давления, скорость движения пузырей Тейлора и распределение скорости жидкости за его кормой описаны в [193]. Показано, что отношение скорости движения преследующего пузыря к скорости в стационарном снарядном потоке (см. формулу 2) может быть больше четырех для расстояний между ведущим и преследующим пузырями менее  $2 \div 3 D$ .

Представлены результаты исследования взаимодействия между последовательными пузырями [194]. Наблюдалась значительная деформация и колебание носика преследующих пузырей, вызванная колебаниями дна ведущего пузыря. Влияние следа ведущего пузыря наблюдалось на расстоянии порядка  $50D$ . Была предложена эмпирическая корреляция для определения скоростей преследующих пузырей.

Статистические параметры восходящего снарядного потока исследованы в [195, 196]. Измерения длин пузырей, скоростей их носов и корм проводились в пяти положениях вдоль трубы с использованием оптических датчиков. Показано, что увеличение расстояния от входа в трубу приводит к увеличению длины как пузырей Тейлора, так и жидких пробок. Показано, что наибольшую скорость движения имеют пузыри Тейлора с длиной предшествующей жидкой пробки менее  $3D$ . Теоретические исследования минимальной длины жидких пробок для выполнения условия стационарного движения снарядного потока приведены в [197, 198].

Для описания снарядного режима течения было предложено несколько теоретических моделей [199, 200]. CFD исследование структуры снарядного потока представлено в [201]. Из-за сложной структуры и неустойчивости таких потоков, канонических моделей для их предсказания до сих пор не разработано. Поэтому большое внимание уделяется экспериментальному исследованию локальной структуры снарядных течений. Недавние работы посвящены исследованию гидродинамических характеристик потока жидкости, включая форму пузырей Тейлора, касательных напряжений и теплообмена вокруг пузырей и в области следа.

Характеристики жидкой фазы представляют значительный интерес. Некоторые исследования касаются распределения скорости жидкости за кормовой частью пузырей Тейлора. Результаты, полученные при визуализации потока, приведены в [202]. Вблизи кормы пузырей профили скорости значительно деформированы, они восстанавливаются на расстоянии  $12D$ . Поле течения жидкости вблизи пузыря Тейлора изучалось в [203] методом PIV и импульсной теневой фотографии. Турбулентная структура в зоне следа пузырей Тейлора была исследована с помощью PIV в [204].

Распределение скорости жидкости в кольцевой пленке вокруг пузырей Тейлора является важной информацией для моделирования снарядного потока. Поле скорости жидкости в области носа пузыря Тейлора и поле скоростей вокруг него исследовано в [205–207]. Показано, что в начальной области жидкой пленки жидкость ускоряется вниз, а на определенном расстоянии от носика пузыря поток приобретает характеристики свободно падающей пленки.

В недавно представленной обзорной работе [208] было указано на очень малое количество работ, посвященных изучению касательных напряжений в снарядном потоке. Такие данные можно найти в ограниченном количестве исследований [201, 209–214], существенная часть которых была выполнена в ИТ СО РАН.

Для теоретических моделей необходимо понимание закономерностей распределения локального газосодержания в областях пузырей Тейлора и жидких пробках и обмен газом между ними, в отрыве мелких пузырей от кормовой части газовых снарядов, их повторное присоединение [182, 215, 216].

Актуально проведение исследований локального теплообмена снарядных потоков [217–222]. В качестве основного метода проведения исследований используется термография.

Большинство экспериментальных исследований снарядных течений выполнено в восходящем потоке. Информация о гидродинамике и теплообмене снарядного потока все еще ограничена. Исследование присоединенных пузырей Тейлора важно и для вопросов безопасного

развития аварии типа «межконтурная течь», и для изучения локальных параметров снарядного режима течения.

### **1.2.3 Исследования нисходящего пузырькового потока**

Локальная структура и теплообмен двухфазного газожидкостного течения зависят от направления потока относительно направления силы тяжести из-за действия подъемной силы на дисперсные включения. В восходящем течении подъемная сила и направление потока жидкости однонаправленны, а в нисходящем течении они разнонаправленны.

Перепад давления и истинное газосодержание исследованы в нисходящем и восходящем течении в работе [223]. Показано, что истинное газосодержание выше для случая нисходящего потока. Локальное газосодержание и скорость жидкости имеют максимум на некотором расстоянии от стенки трубы, а в центре существует близкое к гомогенному распределение характеристик потока [224]. Вблизи стенок трубы находится область, свободная от пузырей.

Результаты исследования локальной структуры нисходящего пузырькового потока в трубе внутренним диаметром 15 мм приведены в [225]. Показано, что добавление в поток газовой фазы может приводить к снижению турбулентных пульсаций трения на стенке трубы. В некоторых режимах обнаружен пик газосодержания вне центральной области трубы.

Определению коэффициентов модели потока дрейфа и истинного газосодержания для нисходящего режима течения посвящен цикл работ [226–228]. Предложена формула для определения касательных напряжений, основанная на теории пути смешения.

Исследование параметров восходящего и нисходящего потоков в трубе внутренним диаметром 57,2 мм проведено в [229]. Приведены данные о распределениях скорости жидкости, локального газосодержания и напряжений Рейнольдса.

Исследование гидродинамики нисходящего пузырькового потока в трубе с внутренним диаметром 42,3 мм проведено в [230, 231]. Был использован электродиффузионный метод, средние размеры пузырей в потоке 0,8 и 1,47 мм. Показано, что добавление пузырей в поток приводит к увеличению касательных напряжений. Обнаружено демпфирование турбулентности в пристенной области.

В работах [232–235] приведены данные о структуре нисходящего пузырькового течения в трубах с внутренними диаметрами 25,4 и 50,8 мм. Влияние относительного движения фаз на распределение скорости жидкости, локального газосодержания и размеров пузырей исследовано



в [217]. Показано, что механизм переноса межфазной границы зависит от газосодержания, размера пузырей и уровня собственной турбулентности жидкости.

Распределение локального газосодержания, площади межфазного взаимодействия, межфазной скорости и среднего Саутеровского диаметра пузырей в нисходящем пузырьковом течении обсуждается в работе [233]. Предложены одномерная модель потока дрейфа и корреляция для определения площади межфазного взаимодействия в нисходящих потоках.

Результаты исследования локальной гидродинамики пузырькового потока с помощью ЛДА приведены в [234, 235]. Для измерения радиальных профилей локального газосодержания и скоростей пузырьков использовалась комбинированная методика, основанная на принципах проводимости и термоанемометрии. Отмечено, что присутствие пузырьков в нисходящем течении приводит к выполаживанию профилей скорости жидкости. Максимум скорости жидкости находился вне центра трубы.

Расчет структуры ламинарного восходящего и нисходящего течения при помощи DNS проведен в [236, 237]. Показано, что течение состоит из двух регионов: гомогенного центрального, находящегося в ядре потока, в котором газосодержание и скорость жидкости постоянны и пристенного слоя с максимумом газосодержания в восходящем течении и свободным от пузырьков слоем в нисходящем течении.

Численное и экспериментальное исследование локальной структуры нисходящего газожидкостного течения в трубе проведено в [238]. Расчеты проведены на основе Эйлеровой двухжидкостной модели. Показан локальный максимум газосодержания и скорости жидкости вблизи стенки трубы. Пульсации скорости жидкости в двухфазном потоке ниже, чем в однофазном вблизи стенки трубы, и выше в ядре потока.

Результаты исследования распределения профилей скорости жидкости и локального газосодержания при малых газосодержаниях приведены в [239]. Обнаружено демпфирование турбулентных пульсаций в пристенной области.

Самоорганизующаяся нейросеть была использована для интерпретации экспериментальных данных для восходящего и нисходящего течений в трубах с внутренними диаметрами 25,4 и 50,8 мм [240]. В продолжении было выполнено исследование локального режима течения с помощью массива из трех двухконтактных датчиков проводимости, расположенных на одной высоте [241].

Численное исследование структуры пузырькового нисходящего потока и его перехода в снарядное течение приведено в [242]. Важной особенностью является предсказание перехода

поперечного профиля локального газосодержания от распределения с максимумом вблизи стенки трубы к распределению с максимумом в центре трубы. Верификация расчетов проводилась на основе данных [233]. Показано, что существенным отличием восходящего потока от нисходящего, является значительное увеличение коалесценции пузырей в последнем.

Данные о локальной структуре нисходящего потока при переходе от пузырькового к кольцевому режиму приведены в [243, 244]. Для разных режимов течения предложены корреляции для определения осредненного газосодержания, проведены сравнения с экспериментальными данными.

Подробное сравнение особенностей распределения газовой фазы в восходящем и нисходящем потоках жидкости представлено в [245]. Проведено экспериментальное исследование и обзор работ и предлагаемых эмпирических зависимостей. Показано существенное различие в распределении локального газосодержания при пузырьковом и снарядном режимах течения. При изменении знака в модели потока дрейфа в различных корреляциях, предложенных в литературе для восходящего режима течения, можно удовлетворительно предсказывать поведение нисходящих газо-жидкостных потоков, и наоборот.

Исследование поведения пузырей газа в восходящем и нисходящем потоках выполнено с помощью четырехконтактного оптического датчика [246]. Предложена модель для восстановления компонент скорости пузырей газа при предположении, что плоскость симметрии пузырей перпендикулярна направлению движения. Показано, что увеличение расхода газа приводит к интенсификации поперечного перемещения пузырей для обоих типов течения, а увеличение расхода жидкости снижает этот эффект для восходящего потока, но увеличивает для нисходящего. Увеличение расхода газа приводит к степенному профилю газосодержания в восходящем потоке и распределению с пиком вне центра трубы в нисходящем потоке. Увеличение скорости жидкости приводит к степенному распределению профилей газосодержания в обоих случаях. При малых расходах жидкости наблюдаются седлообразные профили газосодержания для восходящего и однородное распределение в центральной области трубы для нисходящего потока.

Большой обзор работ, посвященных исследованию локальной структуры нисходящих потоков, приведен в [247]. Особое внимание уделено поиску закономерностей распределения локального газосодержания и площади межфазной поверхности.

В работе [248] с помощью метода быстрых отсечек проведено исследование газосодержания в нисходящем потоке при его движении в трубе с внутренним диаметром 25 мм.

Проведено обобщение результатов, полученных при использовании 39 корреляций, найденных авторами в литературе. Показано, что для малых газосодержаний требуется улучшение существующих моделей.

Результаты моделирования нисходящего потока с помощью системного кода RELAP5/MOD3.2 и корреляцией для опускного режима течения [249] приведены в [250]. Показано, что для дальнейшей разработки системных кодов, важно одновременное исследование локального газосодержания, площади межфазной поверхности и скоростей пузырей газа и жидкости.

Экспериментальная база данных о распределении локальных характеристик движения газовой фазы в нисходящем потоке в трубе с внутренним диаметром 25,4 мм при переходе от пузырькового к снарядному режиму течения представлена в [251]. Приведены данные о распределении локального газосодержания, площади межфазного взаимодействия, межфазной скорости, Саутеровского диаметра. Большое внимание уделено эволюции структуры потока вдоль осевой координаты, проведено обсуждение основных механизмов. Построена одномерная модель потока дрейфа (МПД) с погрешностью менее 10%.

Анализ влияния входных условий на характеристики движения пузырей и карты режимов течения приведены в [252]. Представлены данные о распределении локального газосодержания, площади межфазной поверхности, Саутеровского диаметра пузырей и их скорости. Для исследования гидравлических потерь в двухфазном потоке был использован подход Локарта-Мартинелли.

В ряде работ экспериментально и численно обнаружено подавление турбулентных пульсаций течения в пристенной области [225, 230, 231, 236, 238, 239]. Отмечено влияние изменения размеров дисперсных включений даже при небольших относительных расходах газа и числах Рейнольдса турбулентного потока. Необходимо детальное исследование гидродинамики и теплообмена нисходящих потоков.

#### **1.2.4 Особенности отрывных пузырьковых потоков**

В отрывных потоках значительное влияние на передачу импульса, массы и тепла оказывает возвратное течение [253–256]. Одними из первых исследований двухфазных пузырьковых течений за внезапным расширением горизонтального канала были экспериментальные работы [257] и [258]. Исследованы перепад давления, размер пузырей и локальное газосодержание, осредненные и пульсационные характеристики несущей и

дисперсной сред. Рост продольного градиента давления и дробление пузырей приводили к уменьшению их размеров. Длина зоны рециркуляции составляла приблизительно  $7H$ , где  $H$  - высота ступеньки.

Расчетно-экспериментальное исследование пузырькового восходящего потока при внезапном расширении трубы проведено в [259]. Измерены средняя и пульсационная осевая скорость, распределение пузырьков по размерам, локальное газосодержание, перепад давления и касательные напряжения. Распределения пульсаций скорости пузырей и несущей фазы качественно подобны.

Измерения в горизонтальном потоке воздушно-масляной смеси в переходном и кольцевом режимах течения проведены в [260]. Показано, что концентрация газа увеличивалась сразу после разделения потока в зоне рециркуляции. Экспериментальное исследование влияния пузырей с размерами  $d_n = 0,3 \div 4,5$  мм и расходным газосодержанием  $\beta = 0 \div 10$  %, на турбулентную структуру восходящего потока воды и  $\text{CO}_2$  проведено в [261]. Маленькие пузырьки были вовлечены в возвратный поток и имели отрицательную скорость в отрывной области потока. Они присутствовали почти по всему сечению трубы, а крупные пузыри в основном проходили через ядро потока и слой смешения. Осевая скорость жидкости существенно зависит от размеров пузырей.

Обзор течений отрывных двухфазных потоков приведен в [262]. Показано, что ни одна из существующих корреляций не может точно предсказать экспериментальные данные. Большинство корреляций некорректно оценивают данные, на стенде, где доминирует поверхностное натяжение. Кроме того, некоторые корреляции значительно занижают результаты для очень больших тестовых участков. Обсуждается влияние чисел Бонда, Вебера, Фруда и Рейнольдса жидкости.

Существует несколько работ, в которых рассматривается численное моделирование пузырьковых течений за внезапным расширением трубы без теплообмена [263, 264]. Математическая модель полидисперсного течения в вертикальной трубе с блокировкой половины поперечного сечения представлена в [263]. Показана сложная взаимосвязь между миграцией, слиянием и дроблением пузырей в потоке.

Модель Эйлера применялась для пузырьковых течений при внезапном расширении трубы в [264]. Расчеты были выполнены с использованием коммерческого пакета CFD STAR-CCM+. Модель была верифицирована на данных [265].

В работах [266–269] исследован теплообмен в пузырьковых потоках в трубах и каналах. Эти исследования показали значительное влияние размера пузырьков и расхода газа на локальную структуру потока и теплообмен. Теплопередача в пузырьковом потоке увеличивается в 3 раза по сравнению с однофазным течением жидкости. Подобное влияние пузырьков на усредненные и турбулентные характеристики движения жидкости также можно ожидать и для двухфазных потоков за внезапным расширением трубы. Турбулентность жидкости моделировалась с использованием изотропной модели  $k-\varepsilon$  [266]. Прямое численное моделирование пузырькового течения с теплообменом было выполнено в [267]. Результаты исследований потоков в микроканалах представлены в [268]. Проведено исследование движения пузырей в вертикальном микроканале в изотермических и неизотермических контролируемых условиях [269]. Однако работы, посвященные исследованию теплообмена отрывного пузырькового потока, в литературе отсутствуют.

### **1.2.5 Гидродинамика и теплообмен двухфазного потока в тепловыделяющих сборках**

Экспериментальные исследования для определения критериев смены режима течения двухфазной смеси в 24 стержневой модели ТВС проведены в [270]. Разработаны аналитические модели для смены режимов течения, приведены данные о скорости мелких и крупных газовых пузырей при квадратной компоновке стержней.

Результаты экспериментального исследования характеристик движения газожидкостной смеси при снаряжном режиме течения в сборке, состоящей из 6 стержней в квадратной компоновке, приведены в [271]. Показано, что скорость движения пузырей Тейлора в межствольных каналах можно достоверно предсказывать с помощью зависимости, предложенной в [191].

Исследование форм и скоростей движения пузырей в одиночной ячейке между четырьмя вертикальными стержнями в квадратной упаковке приведены в [272]. Показано, что движение пузырей существенно зависит от соотношения их диаметра к гидравлическому диаметру канала. Предложены модели для скорости всплытия в неподвижной жидкости  $V_T$  и коэффициента пропорциональности  $C$  при движении пузырей газа в межствольных каналах для корреляции [191].

Исследование характеристик движения одно- и двухфазных потоков в 6 стержневой сборке в квадратной компоновке приведены в [273]. Приведена карта режимов течения, даны сравнения характеристик движения пузырей Тейлора в межствольных каналах с отличающимся профилем поперечного сечения. Показано, что увеличение размера ячеек приводит к увеличению

в них скоростей пузырей Тейлора. Даны рекомендации для использования представленных в литературе моделей для предсказания распределения скорости жидкости и гидравлического сопротивления в однофазном режиме, а также различных характеристик для двухфазных потоков.

Исследование турбулентного межканального переноса в одно- и двухфазных режимах производилось в [274]. Между величиной межканального перемешивания жидкости и пульсациями перепада давления наблюдается связь. Результаты, полученные в двухфазном потоке, соответствуют таковым из [275].

Исследование режимов течения двухфазных потоков в сборке стержней 4x4 проведено в [276]. Для визуализации потока в полость одного из стержней помещался бороскоп. Получены изображения течения с малыми оптическими искажениями, приведены карты режимов течения для межствольных каналов, расположенных в разных позициях поперечного сечения модели. Показано, что переходы режимов течения в различных межствольных каналах можно с хорошей точностью прогнозировать с помощью модели [277].

Экспериментальное моделирование аварийных процессов, происходящих при малых и средних течах, производилось в [278] в системе жидкость-пар. Приведены данные о распределении паросодержания, проведено сравнение с различными моделями.

Исследование характеристик движения недогретого кипящего двухфазного потока в 9 стержневой модели приведены в [279]. С помощью двухконтактного датчика сопротивления, который мог осуществлять перемещение в межствольном пространстве с помощью координатной системы, получены основные характеристики движения газовой фазы (локальное газосодержание, площадь межфазной поверхности, Саутеровский диаметр пузырей). Для измерения распределения скорости жидкости и межфазной скорости использована трубка Пито.

Продолжение предыдущей работы приведено в [280]. Предложены корреляции для вычисления коэффициентов (параметр распределения, скорость дрейфа) для модели потока дрейфа для межствольных каналов. Наилучшее совпадение получено для каналов центрального типа, для периферийных и угловых каналов необходима дальнейшая валидация.

Результаты исследования характеристик двухфазного потока в сборке стержней с квадратной компоновкой приведены в [281]. Измерения производились с помощью электроимпедансного датчика типа проволочная сетка. Приведены данные о распределении локального газосодержания, площади межфазной поверхности, межфазной скорости,

Саутеровского среднего диаметра пузырей в более чем в 500 контрольных точках по всему сечению сборки.

Экспериментальные данные о движении газожидкостного потока в 64 стержневой сборке с квадратной компоновкой приведены в [282]. На основе полученных результатов и литературных данных проведена верификация предложенных в литературе моделей. Показано, что требуются новые данные для верификации моделей при малых расходах газа.

Разработка МПД для сборок вертикальных стержней проведена в [283]. Эксперименты производились при повышенных давлениях и температурах. Для проведения исследований был использован рентгеновский источник и 512 детекторов. Представлены корреляции для параметра распределения  $C_0$  при разном относительном шаге стержней. Скорость дрейфа была основана на корреляции [284]. Также приведены данные о влиянии профилей энерговыделения и дистанционирующих решеток на характеристики потока. Важно отметить, что МПД, основанная на базе данных, полученных при повышенных температуре и давлении, хорошо описывает эксперименты, проведенные ранее в адиабатических условиях [282].

Данные о распределении локального газосодержания, площади межфазной поверхности и скорости газовых пузырей в 64 стержневой модели кипящего реактора проведены в [285]. Эксперименты производились при давлении 100 и 300 кПа с помощью датчиков сопротивления. В отличие от более простых геометрических условий, акты дробления пузырей происходят намного чаще, что приводит к более развитой межфазной поверхности.

Проведены дополнительные экспериментальные исследования в 64 стержневой сборке стержней при малых давлениях и расходах жидкости [286]. Полученные экспериментальные данные были использованы для дальнейшей разработки МПД в вертикальных сборках стержней [286].

Экспериментальные исследования в системе воздух-вода были проведены в сборке стержней 4x4 [287]. Измерения локального газосодержания и скорости пузырей газа осуществлялись с помощью двойного датчика проводимости. Для определения межфазной скорости дополнительно производились исследования с помощью ЛДИС. Приведены данные о распределении локальных параметров потока, за счет перемещения измерительного датчика восстановлены "поля" распределения газовой фазы в межствольном пространстве. Обсуждается взаимосвязь распределения газовой фазы с интенсификацией турбулентности в жидкой фазе.

Для наработки данных, необходимых для создания корабельных атомных станций, проведены экспериментальные и теоретические исследования в качающейся сборке стержней

3x3 при неподвижной жидкости [288, 289]. Показано, что скорость всплытия пузырей увеличивается с увеличением амплитуды колебаний и уменьшается с уменьшением периода.

Карты режимов течения в вертикальной сборке стержней 3x3 приведены в [290]. Измерения проводились при атмосферном давлении и относительно малых расходных параметрах. Показано, что анализ данных флуктуаций показаний дифференциального датчика давления позволяет с хорошей достоверностью определять режим течения.

В приведенных в литературе данных не хватает детальной информации о влиянии ДР на распределение пузырей в потоке, их скорости, процессов коалесценции, дробления и теплообмена двухфазного потока.

### 1.3 Неизотермические потоки в камерах смешения

Функционирование современных реакторных установок предполагает взаимодействие потоков теплоносителя с разной температурой. В реакторах с ЖМТ это может происходить, например, в верхнем баке на выходе из ТВС. Среднее повышение температуры при течении теплоносителя через ТВС обычно около 150 °С. Другая вероятная ситуация – движение горячего и холодного потоков ТЖМТ в вертикальном канале с последующим выходом в верхний бак.

Ранее было показано, что турбулентное перемешивание потоков жидкости разной температуры может приводить к высокоинтенсивным колебаниям температуры и появлению циклических термических напряжений в местах сочленения трубопроводов и в конструкции корпуса реактора [291]. Следствием этого является термическая усталость и возможное разрушение оборудования реакторных установок. Эта проблема является серьезной угрозой безопасной эксплуатации РУ. Поэтому для обоснования проектных решений и безопасности атомных электростанций (АЭС) важен правильный расчет и предсказание поведения температурных полей как в теплоносителе, так и на поверхности различных узлов оборудования.

Проведено достаточно большое количество исследований неизотермического смешения в тройниковых смесителях (см. таблицу 3). Обозначения теплоносителей совпадают с таблицей 1. Основным методом проведения измерений являлись термопарные измерения. Большинство работ проведено с использованием воды или воздуха в качестве рабочей жидкости. Исследования смешения жидкометаллических теплоносителей (натрий) ограничено [292, 293].

Проблемой изучения феномена тепловой перемежаемости и возможности моделирования этого процесса занимаются ведущие мировые организации: Европейская атомная комиссия, министерство энергетики США, японское и корейское ядерные общества. Это вызвано



сложностью связанного процесса гидродинамики и теплообмена. Появились и работы, нацеленные на получение эталонных баз данных, для верификации и валидации кодов вычислительной гидродинамики.

Исследование процесса неизотермического перемешивания двух потоков воды с разной температурой проведено [294] в плоском тройниковом смесителе при помощи инфракрасной термографии. Приведены данные о турбулентных пульсациях теплоносителя, измерены частотные, спектральные характеристики течения. Выявлено наличие интервалов энергетических спектров, удовлетворяющих закону Колмогорова  $-5/3$  в диапазонах частот от 4 до 40 Гц.

За рубежом в последнее время были проведены две серии экспериментов, непосредственно направленных на получение подробных экспериментальных данных для тщательной проверки возможности CFD моделирования турбулентного перемешивания жидкостей разной температуры и расчета тепловой перемежаемости разнотемпературных областей водяного теплоносителя в Т-образном смесителе.

В первом из экспериментов проводились исследования на масштабной модели тройникового смесителя, используемого на атомной станции [1, 295]. С использованием термопар проведены измерения температуры жидкости вблизи стенки трубы для трех различных соотношений потоков горячей и холодной жидкости. Были выполнены первые CFD расчеты, результаты которых показывают, что стандартные методы RANS и URANS не в состоянии предсказать реалистичный процесс. Экспериментальные данные легли в основу международного слепого теста OECD/NEA. В этом тесте предлагалось рассчитать гидродинамику и тепловые поля при смешении потоков воды, имеющих разные температуры в Т-образном смесителе. Были выполнены расчеты этого процесса при помощи ANSYS CFX [296], LES моделирования [297], модели Ланжевена для дисперсии частиц [298]. Следует отметить хорошие результаты для трех вычислительных кодов: Кабаре, Conv3D, и Nek5000 [299], [300].

Вторая серия экспериментов выполнена в лаборатории по атомной энергии Института технологии энергетики, Цюрих, Швейцария [2, 301], где было проведено моделирование этого процесса. Результаты сравнения с экспериментом были лучше при использовании LES моделирования, показывая неплохое соответствие для распределения температуры вблизи стенки. Расчеты тем не менее предсказывали несколько большие амплитуды пульсаций температуры, чем наблюдаемые в модельных экспериментах. Для моделирования процессов перемешивания в основном используются прозрачные среды. Требуются данные о структуре течений при малых числах Прандтля, характерных для жидких металлов [136, 302]. В настоящее

время отсутствуют детальные экспериментальные данные по теплообмену и гидродинамике ТЖМТ, сфокусированные на развитии процесса смешения разнотемпературных потоков теплоносителя при турбулентном течении и позволяющие проводить верификацию CFD кодов.

Таблица 3 – Исследования неизотермического смешения потоков

| Год  | Источник | Жидкость в основном канале | Жидкость в боковом подводе | Размер основного канала | Размер бокового подвода | Отношение скоростей |
|------|----------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1980 | [303]    | раствор NaOH               | горячая вода с индикатором | ⊙90                     | ⊙180                    | 0,39–1,58           |
| 1981 | [304]    | Вз 35 С                    | Вз 25 С                    | ⊙51                     | ⊙5–13                   | 2–5                 |
| 1983 | [305]    | Вз                         | Вз                         | 1500x1500               | ⊙50                     | 0,25–2              |
| 1984 | [292]    | Н (хол.)                   | Н (гор.)                   | ⊙300                    | ⊙150                    | 0,5–2,65            |
| 1989 | [306]    | В                          | В                          | 610x1067                | ⊙14                     | 1–7                 |
| 1993 | [307]    | Вз                         | Вз                         | ⊙3810                   | ⊙950                    | 0,5–0,8             |
| 2002 | [308]    | В (гор.)                   | В (хол.)                   | ⊙100                    | ⊙50                     | 2                   |
| 2003 | [309]    | В (хол.)                   | В (гор.)                   | ⊙25,4                   | ⊙6,35                   | 2,5–25              |
| 2003 | [310]    | В (гор.)                   | В (хол.)                   | ⊙150                    | ⊙50                     | 0,5–5               |
| 2003 | [311]    | В (гор.)                   | В (хол.)                   | ⊙102                    | ⊙20,4                   | 5–50                |
| 2010 | [312]    | В (гор.)                   | В (хол.)                   | ⊙150                    | ⊙50                     | 0,7–4,35            |
| 2006 | [313]    | В (хол.)                   | В (гор.)                   | ⊙102                    | ⊙102                    | 4,7                 |
| 2007 | [314]    | В (хол.)                   | В (гор.)                   | ⊙50                     | ⊙24                     | 0,45, 0,61          |
| 2008 | [315]    | Вз (гор.)                  | Вз (хол.)                  | 300x250                 | 250x15                  | 0,01                |
| 2009 | [316]    | В (гор.)                   | В (хол.)                   | ⊙150                    | ⊙50                     | 0,5–4,5             |
| 2009 | [2]      | В                          | В                          | ⊙51                     | ⊙51                     | 0,4–1,67            |
| 2010 | [301]    | В 15 С                     | В 30 С                     | ⊙140                    | ⊙100                    | 1                   |
| 2010 | [293]    | Н (хол.)                   | Н (гор.)                   | ⊙494                    | ⊙68                     | 0,5                 |
| 2010 | [317]    | В 15 С                     | В 30 С                     | ⊙140                    | ⊙100                    | 4                   |

## 2 Методы экспериментальных исследований гидродинамики и теплообмена

Существует достаточно широкий выбор методов для исследования одно- и двухфазных потоков. С развитием компьютерной техники и средств получения и анализа экспериментальной информации увеличиваются временное и пространственное разрешения. Существует два основных типа измерительных методов: контактные, при использовании которых в поток вносится возмущение, вызванное присутствием датчиков, и бесконтактные (неразрушающие). Достаточно подробный обзор приведен в [318].

### 2.1 Бесконтактные методы исследования.

Основные характеристики неразрушающих методов исследования: измеряемые характеристики, основные ограничения, пространственное разрешение (*пр.разр.*), временное разрешение (*вр.разр.*), приведены в таблице 4.

*Перепад давления* является определяющим параметром при проектировании. По перепаду давления можно судить о режиме течения и распределении фаз. Измерения производятся с помощью U образного отвода или различных датчиков давления (напр. пьезоэлектрических) [319–321].

*Анализ пульсационных характеристик сигналов* дает представление о режиме течения и уровне турбулентности потока. Полученные сигналы интерпретируются различными методами анализа: статистическим, спектральным [322], фрактальным [323], временным и частотным, исследованием автокорреляционной функции [321].

*Метод отсечек* основан на одновременном перекрытии входного и выходного сечений канала, после чего измеряются уровни жидкости и газа для определения истинного газосодержания.

*Методы с добавлением трассеров* применяются для визуализации структуры потока жидкости и характеристик перемешивания.

В качестве трассеров могут быть использованы:

*Жидкие трассеры* (солевые, красящие, радиоактивные изотопы).

*Пузыри газа или пара, дым.*

*Твердые частицы* (крашеные, магнитные и флуоресцентные).

Таблица 4 – Бесконтактные экспериментальные методы.

| Метод                                                                  | Изм. хар. потока                                                           | Ограничения                                                                                                                                                                    | Пр.раз.               | Вр.раз.     |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------|
| Перепад давления                                                       | Перепад давления, концентрации жидкой фазы и дисперсной фаз, режим течения | Требуется интерпретация данных                                                                                                                                                 | Интег. метод          | Низк.       |
| Стат. хар. сигналов                                                    | Режим течения и турбулентные хар.                                          |                                                                                                                                                                                | Высок.                | Высок.      |
| Метод отсечек                                                          | Распр. размера пузырей, истинное газосодержание                            | Требуется модель. Можно использовать только для суспензий                                                                                                                      | Интег. метод          | стац.       |
| Трассеры                                                               | Распределение жидкости и характеристики смешивания                         | Поиск подходящих трассеров                                                                                                                                                     | Интег. метод          | стаб. сост. |
| Метод проводимости                                                     | Распределение жидкости                                                     | Только электропроводящ. жидкости                                                                                                                                               | Интег. метод          | Низк.       |
| Поглощение нейтронов<br>$\gamma$ -излучение<br>рентгеновское излучение | Распределение фаз                                                          | Требуется источник нейтронов<br>Цена, безопасность                                                                                                                             | Усред.                | Высок.      |
| Световое излучение                                                     | Газосодержание и границы раздела фаз                                       | Прозрачные стенки и жидкость (модель) низкие газосодержания и малый диаметр колонн                                                                                             | Интег. метод          | Высок.      |
| Поглощение ультразвука                                                 | Концентрация                                                               | Непрерывная жидкая фаза, малый диаметр колонны                                                                                                                                 | Знач., устр. по длине | Высок.      |
| Фотография и анализ изображений                                        | Режим течения, характеристики движения пузырей                             | В основном прист. обл., прозрач. стенки и жидкость, низкое газосодержание.<br>Эффект “потери” пузырей на последовательных изображениях и перекрывание одними пузырьками других | Высок.                | Высок.      |

Продолжение таблицы 4

| Метод                                                               | Изм. хар. потока                                             | Ограничения                                                                         | Пр.раз. | Вр.раз. |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|
| Радиография                                                         | Размер и форма пузырей, течения.                             | Повышенная опасность, низкое содержание газа.                                       | Высок.  | Низк.   |
| PIV                                                                 | Поля скорости жидкости и газа                                | Низкое содержание газа.                                                             | Высок.  | Высок.  |
| Ядерно-магнитный резонанс                                           | Содержание жидкости, скорости фаз, эффективность смачивания  | Цена и размер оборудования                                                          | Высок.  | Низк.   |
| Лазерно-доплеровская анемометрия и фазовая доплеровская анемометрия | Скорость жидкости, скорость скольжения газа и размер пузырей | Прозрачная жидкость, относительно низкие газосодержания (В случае PDA очень низкие) | Высок.  | Высок.  |
| Электродиффузионный метод (Полярография)                            | Трение на стенке                                             | Только водный раствор электролита                                                   | Низк.   | Высок.  |
| Трассировка радиоактивных частиц                                    | Поля скорости и траектории                                   | Требуется сложная калибровка, использование радиоактивных трассеров                 | Высок.  | мин.    |
| $\gamma$ или рентгеновская томография                               | Распределение содержания фаз                                 | Цена, для большого содержания частиц требуются высокие энергии                      | Низк.   | Низк.   |
| Томография на основе проводимости или сопротивления                 | Распределение фаз                                            | Методы интерпретации данных находятся в стадии развития                             | Высок.  | Высок.  |
| Ультразвуковая томография                                           | Распределение содержания фаз                                 | Низкое содержание газа                                                              | Низк.   | Низк.   |

Метод проводимости [321] используется при условии, что газожидкостная смесь обладает достаточной электропроводностью.

*Методы, основанные на поглощении нейтронов* [324], *гамма- и рентгеновских излучений* [323, 325] основаны на том, что жидкость и дисперсная фаза имеют разную степень поглощения.

В прозрачной жидкости, содержащей газы, *поглощение света* является функцией от площади межфазной поверхности. Ограничениями данного метода является его применимость только для потоков с пузырьками сферической формы.

*Ультразвуковое исследование* позволяет определить концентрацию фаз за счет разного поглощения ультразвука жидкостью и газом. По сравнению с методами, основанными на видимом излучении, допустимо использование в непрозрачных жидкостях.

*Методы визуализации.* Появление новых высокоскоростных компьютеров и методов обработки полученной цифровой информации существенно расширяет возможности исследования потоков. Разрабатываются новые, более мощные средства для обработки полученной информации, включая методы компьютерного видения [326] и нейросети [327].

*Фотография и анализ изображений.* Режим течения, характеристики движения пузырей.

Ограничения метода:

- при больших газосодержаниях можно наблюдать поток только в районе стенки, из-за того, что в среднем сечении канала пузырьки будут перекрывать друг друга;
- требуются прозрачные жидкость и стенки канала;
- необходимо избавляться от оптических искажений, получаемых из-за кривизны стенок труб;
- при определении локального газосодержания возможны “потери” пузырьков на последовательных изображениях и перекрывания одними пузырьками других, что приводит к снижению точности.

*Цифровая трассерная визуализация, PIV.* Метод исследования полей скоростей прозрачных сред, основанный на корреляционном анализе последовательных изображений [328, 329].

*Ядерно-магнитный резонанс* может быть адаптирован для исследований параметров многофазных потоков.

*Лазерные доплеровские измерители скорости (ЛДИС)* [330], [331] являются абсолютным методом, позволяющим проводить измерения практически всех основных гидродинамических параметров течения: вектор средней скорости, пульсации скорости, компоненты тензора напряжений Рейнольдса, спектры пульсаций скорости жидкости. Метод применим для потоков

с относительно высоким содержанием газа [332].

Для исследования течений дисперсных потоков типа газ - твердые частицы и газокапельные потоки применяются *PDPA* или *PDA* (*фазовые доплеровские анемометры*) [333], [334]. Обзор, описывающий возможности фазовых доплеровских анемометров и их основные ограничения представлен в работе [335].

*электродиффузионный метод* позволяет производить исследование осредненных и пульсационных значений касательных напряжений.

*При радиоактивной трассировке* используются сферы с нейтральной плавучестью, содержащие радионуклиды, излучающие в  $\gamma$  – диапазоне [336].

*Томография* основана на измерении физических свойств потока, зависящих от концентраций фаз (проводимость, поглощение излучения, ядерно-магнитный резонанс). Измерения производятся с различных точек и позволяют получить средние значения параметров потока в заданной хорде течения. Для проведения томографических измерений необходимо, чтобы датчики вращались вокруг канала, что приводит к невозможности съемки мгновенных значений. Существуют разные виды томографических систем.

*Томография, основанная на поглощении  $\gamma$  или  $X$  излучений* прямо пропорциональном плотности потока. Итоговое изображение представляет собой карту распределения фаз.

*Томография, основанная на измерении электрического сопротивления* [337]. Это простой в применении метод с очень хорошим временным разрешением.

*Ультразвуковая томография* основана на том, что распространение ультразвуковой волны зависит от распределения фаз, режима течения и размера дисперсных частиц. В работе [338] предложен комбинированный метод, основанный на измерении поглощения и скорости распространения ультразвуковых волн, что позволяло определить распределение твердой и газовой фаз.

Для бесконтактных измерений температуры могут быть использованы *пирометры* и *тепловизоры*, в том числе высокоскоростные.

## 2.2 Контактные методы

Широко применяются контактные методы исследования (Таблица 5). Применение таких методов обусловлено тем, что в производственных условиях бесконтактные методы могут быть неприменимы по следующим причинам:

- непрозрачность стенок каналов для визуального наблюдения и высокие концентрации дисперсных включений препятствуют проведению фото и видео съемки;
- высокая плотность пузырей не позволяет использовать PIV и ЛДА;
- бесконтактные методы зачастую дают усредненные по времени данные, что не позволяет произвести их статистическую обработку и делает такие методы неприменимыми к исследованию нестационарных процессов;
- некоторые из неразрушающих методов небезопасны и дороги;
- контактные методы зачастую дешевле и проще в применении.

*Игольчатые датчики проводимости* позволяют «накалывать» пузыри. Используются как одиночные датчики (для определения локального газосодержания и частоты следования пузырей), так и двойные, а также многоконтактные (скорость, площадь границы раздела фаз, средней длины хорд пузырьков).

*Оптические игольчатые датчики* изготавливаются из кварца [339] или сапфира [318]. Принцип их действия основан на отражении инфракрасного или лазерного луча от тонкого кончика датчика, находящегося в жидкой или газовой фазах [340]. U – образные датчики с оплавленным кончиком сферической формы использовались в [339]. Можно отметить малую механическую прочность такого решения. Датчик, состоящий из конической и цилиндрической частей описан в [341]. Он позволял одновременно измерять несколько характеристик потока подобно двойному датчику проводимости.

Основой *термоанемометрии* является теплообмен обтекаемой потоком нагреваемой проволоки. Для определения скорости используется зависимость, основанная на законе Кинга:

$$E = A + BU^n \quad (3),$$

где E – напряжение на датчике, A, B и n – калибровочные коэффициенты. Исследуемыми характеристиками являются газосодержание, скорость жидкости и ее пульсации, площадь раздела фаз.

*Ультразвуковые зонды* основаны на измерении поглощения и отражения ультразвуковых волн. Метод может быть использован в непрозрачных, вязких и агрессивных средах.

*Трубки Пито* используются для определения скорости жидкости и калибровки других методов измерений. Для проведения измерений направлений векторов скорости жидкости используются трубки *Пито-Прандтля*. Они отличаются малой чувствительностью и большой механической прочностью. Для измерений касательных напряжений используется *трубка Престона*.



Таблица 5 – Контактные измерительные методы

| Метод                                                           | Изм. характеристики потока                                                                                                          | Ограничения                                                                                                                                                                                                                  | Прост. разр.   | Врем. разр.      |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------------|
| Иголочные датчики                                               | Газосодержание, скорость пузырей, распределение хорд пузырей, распределение по размерам, форма пузырей, площадь границы раздела фаз | Низкое содержание твердых частиц.<br>Не адаптировано для измерений вблизи стенок.<br>Специальная жидкость (электролит для датчиков проводимости).<br>Требуется модель.<br>Много-элементарные зонды: необходима реконструкция | мм.            | с.               |
| Датчики, основанные на теплопере- носе                          | Газосодержание, средняя скорость жидкости, среднеквадратичная скорость жидкости                                                     | Низкое содержание твердых частиц.<br>Жидкая фаза однородна по температуре.<br>Требуется интерпретация сигнала.<br>Чувствительность метода зависит от скорости                                                                | мм.            | с.               |
| Ультразвуко- вые зонды<br>Поглощение<br>Доплеровско- е смещение | Газосодержание или площадь границы раздела фаз.<br><br>Диаметр пузырька или его скорость                                            | Низкие содержания газа (<20%)<br><br>Сферические пузырьки.<br>Небольшие расстояния.                                                                                                                                          | см.<br><br>см. | мин.<br><br>мин. |
| Трубки Пито                                                     | Направление потока, перепад давления, скорость жидкости                                                                             | Умеренные содержания газа                                                                                                                                                                                                    | см.            | мин.             |

## **2.3 Методы, применявшиеся в данном исследовании**

Наибольшее разнообразие измерительных методов в данном диссертационном исследовании было применено для случая многостержневой модели ТВС. В разделе приведены их основы, а частные подробности применения приведены в соответствующих параграфах текста диссертации.

### **2.3.1 Краткое описание экспериментальной модели**

#### **тепловыделяющей сборки**

Экспериментальная модель тепловыделяющей сборки состояла из 37 вертикальных стержней. Обечайка рабочего участка была выполнена по форме, полученной соединением между собой 37 правильных шестигранников с  $S/D=1,4$ . Она состояла из трех частей: верхняя и нижняя высотой по 500 мм каждая были выполнены из нержавеющей стали, центральная (200 мм) – из полированного оргстекла. Центральная часть применялась для проведения измерений с помощью оптических методов. Сверху и снизу от экспериментальной модели располагались входной и выходной коллекторы высотой около 400 мм каждый.

Внутри экспериментальной модели установлены 37 вертикальных стержней с внешним диаметром 9,1 мм. Для их позиционирования применялись 37 ячеечные фрагменты дистанционирующих решеток производства НЗХК. Они располагались на расстояниях 50, 300, 1150 мм от входа в экспериментальную модель. В средней части экспериментальной модели устанавливалась исследуемая решетка, геометрические характеристики которой могли изменяться в зависимости от задач исследования.

### **2.3.2 Метод определения коэффициентов трения и гидравлического сопротивления**

Определение потерь давления при течении жидкости вдоль пучка стержней – имитаторов ТВЭЛов и на дистанционирующих решетках производилось на основе измерения статического давления вдоль канала. Для измерений использовались две трубки с отборами давления. Неподвижная трубка имела отбор давления на расстоянии 100 мм от нижнего торца пучка стержней. Подвижная трубка длиной 2100 мм имела отбор давления на расстоянии 1200 мм ее верхнего торца. Эта трубка помещалась в центральном положении и могла перемещаться вдоль сборки. В процессе эксперимента при неизменном расходе жидкости производилось измерение перепада давления между отборами на неподвижной и подвижной трубках при различных

положениях подвижной трубки с шагом 20 или 40 мм. Время записи реализации для одного положения трубки – имитатора составляло 10 с. После записи реализации производилось осреднение сигналов.

Коэффициент гидравлического сопротивления (КГС,  $\xi$ ) приводился к средней скорости жидкости в пучке имитаторов твэл (без ДР и ПР). Коэффициент гидравлического сопротивления рассчитывался по формуле:

$$\xi = 2 \frac{\Delta P}{\rho V_{\text{ж}}^2} \quad (4),$$

где  $\Delta P$  - перепад давления на решетке,  $V_{\text{ж}}$  – скорость жидкости, определенная как расход, деленный на площадь проходного сечения 37ми стержневого канала,  $\rho$  - плотность жидкости.

Значения коэффициента гидравлического сопротивления определялись при разных числах Рейнольдса, которое вычислялось по формуле, где в качестве характерного размера взят гидравлический диаметр пучка имитаторов стержней в канале.

Измерение перепадов давления осуществлялось с помощью преобразователей перепада давления Метран-100 – ДД с пределами измерений 63 кПа и пределом допускаемой неопределенности измерений 0,5%.

### 2.3.3 Методика измерения осевой скорости

Для измерения вертикальной компоненты скорости и применялась трубка Пито. В качестве чувствительного элемента использовалась капиллярная трубка с внутренним диаметром 0,6 мм. Торец капилляра располагался на расстоянии 880 мм от нижней части модельного твэла. Трубка с датчиком скорости помещалась на месте центрального стержня сборки. Датчик скорости находился в прозрачной секции канала. Это позволяло точно позиционировать его по отношению к изучаемой решетке как по продольной, так и по азимутальной координатам. Общий вид измерительной трубки с датчиком скорости показан на рисунке 1.

В одном поперечном сечении с датчиком находился отбор статического давления, представлявший собой отверстие диаметром 0,9 мм, просверленное в боковой поверхности трубки. Между отбором статического давления и выходом полости державки находилась пробка, в которую была впаяна трубка с внутренним диаметром 3 мм. Эта трубка впаивалась также в штуцер на верхнем конце измерительной трубки. Отверстие капиллярной трубки выходило в полость измерительной трубки. В верхней части измерительной трубки было просверлено отверстие диаметром 1,5 мм для отбора давления из капиллярной трубки. На измерительную

трубку в верхней части надевалась муфта с боковым штуцером. Муфта герметизировалась с помощью резиновых колец, поджимаемых накидными гайками. Центральный и боковой штуцеры соединялись пластиковыми трубками с дифференциальным датчиком давления МЕТРАН - 100 ДД.

Центр капиллярной трубки находился на расстоянии 1,8 мм от боковой поверхности измерительной трубки. Таким образом, отбор динамического давления располагался посередине между соседними имитаторами твэлов.

Определение скорости жидкости  $V$  производилось по измеренному перепаду давления  $\Delta P$  в соответствии с формулой:

$$V = (2 * \Delta P / \rho)^{1/2} \quad (5),$$

Расстояние между дистанционирующей и изучаемой решеткой составляло 320 мм. Измерения скорости проводились на расстояниях 5, 25, 50, 80, 120, 160, 200 и 250 мм от ее верхнего торца. Неопределенность измерения не превышала  $\pm 2\%$ .



Рисунок 1 - Датчик скорости, установленный на стержне – имитаторе твэла.

### 2.3.4 Методика измерения касательных напряжений

Метод основан на измерении скорости диффузии активных ионов на поверхности датчика (электрического тока), зависящего от гидродинамических параметров потока [342]. Основы применения метода в двухфазных течениях заложены в ИТ СО РАН. Датчик является катодом измерительной ячейки (см. рисунок 2). Для предотвращения влияния анодных токов второй электрод имеет значительно больший размер. На электродах происходит перезарядка ионов, и концентрация активных ионов вблизи катода стремится к нулю. Преимуществами метода являются: неразрушающее воздействие, высокое временное разрешение, пристенная локализация.

Был изготовлен измерительный стержень длиной 2550 мм. В нем было просверлено отверстие диаметром 4,3 мм для размещения электродиффузионных датчиков трения. Втулка с датчиками трения вклеивалась в отверстие. После этого наружная поверхность трубки с вклеенными датчиками притиралась с помощью притирочного порошка, а затем шлифовалась мелкой наждачной бумагой. Качество заделки датчиков контролировалось с помощью микроскопа. Датчики помещались на расстоянии 1630 мм от верхнего торца трубки. Выводы от датчиков соединялись с усилителем, установленным на верху имитатора твэла.

Использовался основанный на дистиллированной воде раствор, содержащий углекислый натрий (26 г/л), ферро- и феррицианид калия (2,1 г/л и 1,65 г/л). Калибровочная зависимость датчика:

$$\tau_w = BI^n \quad (6),$$

где  $\tau_w$  – касательные напряжения,  $I$  – ток датчика,  $B$  и  $n$  – множитель и показатель степени, определялась в канонических течениях с использованием известных закономерностей, например, формулы Блазиуса. Усиленные сигналы датчиков подавались на АЦП L-CARD E14-140. Одновременно измерялись расход и температура жидкости.

### 2.3.5 Метод исследования теплообмена

Для измерения коэффициента теплообмена  $h$  применялся тепловой участок (см. рисунок 3). Нагревательным элементом 1 являлся участок трубы из сплава Э-110 длиной 500 мм. С обоих концов участка были установлены медные трубы 2 и 3 диаметром 8 мм. Трубы были покрыты изоляцией с внешним диаметром 9 мм. Общая длина измерительной трубки – 2900 мм. Внутри нагревательного элемента располагался датчик температуры 5 – миниатюрный терморезистор

типа М-222. Нагреваемая трубка располагалась таким образом, чтобы датчик температуры был выше дистанционирующей решетки 6.

В нагреваемую трубку вставлялась втулка из текстолита, которая могла перемещаться вдоль оси трубки. В эту втулку клеивалась металлическая пружина, на втором конце которой был приклеен датчик температуры. Датчик прижимался с помощью пружины к внутренней стенке трубы-нагревателя. Для обеспечения теплового контакта использовалась паста КПТ-8 с высокой теплопроводностью. Она наносилась на контактирующую с внутренней стенкой трубы поверхность датчика. Расстояние от нижнего конца нагревателя до датчика температуры составляло 370 мм. Тепловой участок помещался в сборке, состоящей из 37 имитаторов твэла в качестве центрального. К верхнему и нижнему концам медных трубок теплового участка подводились гибкие медные шины. Для измерения температуры жидкости использовался аналогичный датчик типа М-222, заделанный в гильзу из нержавеющей стали. Этот датчик размещался в потоке непосредственно перед исследуемой сборкой стержней.

При монтаже теплового участка были установлены гильзы из изолирующего материала, предотвращающие электрический контакт теплового участка с металлическими элементами экспериментальной установки.

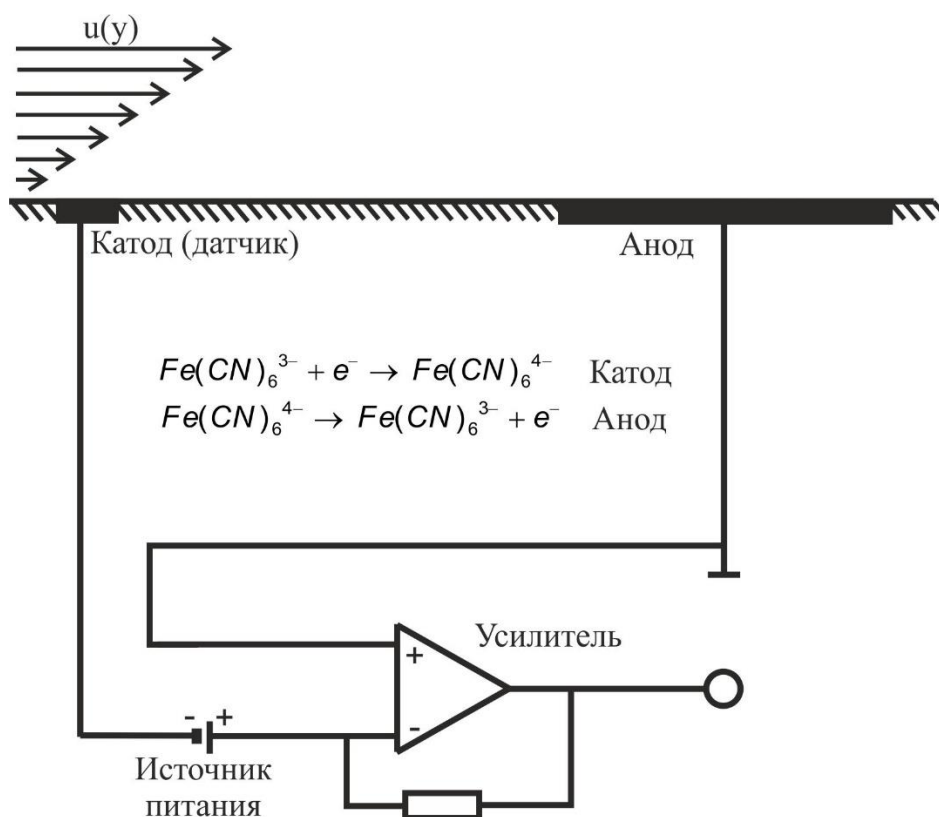


Рисунок 2 - Схема измерения напряжения трения на стенке.

Единственным местом электрического контакта являлось сопряжение нагревательного элемента с исследуемой центральной решеткой.

Тепловой участок был запитан переменным током от мощного понижающего трансформатора. Измерение тока проводилось датчиком тока CSLA 10K фирмы Honeywell. Подаваемый на тепловой участок ток регулировался с помощью автотрансформатора, установленного перед понижающим трансформатором, и составлял 325 А.

В процессе эксперимента проводилась регистрация на компьютере сигналов с двух датчиков температуры, сигнала датчика тока теплового участка, а также перепада давления на расходомерной диафрагме. Коэффициент теплообмена рассчитывался по электрической мощности, выделяемой на нагревателе, и разности температур нагревателя и жидкости. При этом учитывалась поправка, связанная с различием температур внутренней и внешней поверхностей нагревательной трубки.

Распределение температуры в криволинейной стенке с внешним и внутренним радиусами  $r_1$  и  $r_2$ , в которой происходит тепловыделение с объемной плотностью  $q$ , описывается следующей зависимостью (для случая, когда с одной стороны стенка теплоизолирована):

$$T_{ст1} - T_{ст2} = \frac{qr_1}{2\lambda_{ст}} \left( 1 - \frac{2r_2^2}{r_1^2 - r_2^2} \ln \frac{r_1}{r_2} \right) \quad (7),$$

где  $T_{ст1}$  и  $T_{ст2}$  – температуры внешней и внутренней стенок,  $\lambda_{ст}$  – теплопроводность материала стенки.

Во время экспериментов в тепловом участке реализовывался режим постоянного теплового потока. Датчик температуры был расположен на расстоянии от начала нагреваемого участка, на котором происходит стабилизация теплообмена по длине (для случая развитого турбулентного течения жидкости).

Координатное устройство, которое позиционировало датчики скорости, трения и теплообмена, приводилось в движение шаговым двигателем, осуществлявшим вращение измерительных трубок. В процессе измерений трубка совершала один полный оборот. Время, за которое совершался оборот, задавалось программным образом. Управление шаговым двигателем производилось с помощью команд с ЦАП. Одновременно с вращением измерительной трубки с датчиками производилась синхронная запись сигналов датчиков. Вращая измерительную трубку, мы получаем возможность восстановить картину течения жидкости в межтвэльном зазоре по 36 точкам, расположенным через 10 градусов друг от друга.

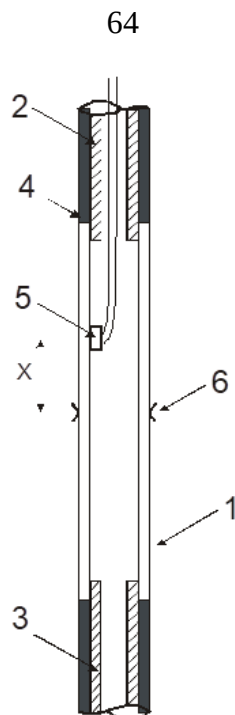


Рисунок 3 – Схема измерения теплообмена на стенке имитатора твэла.

### 2.3.6 Метод измерения осредненной и пульсационной скорости

Измерения распределения скорости течения в соседних ячейках выполнялись для водяного теплоносителя с использованием лазерного доплеровского измерителя скорости ЛАД-0х. Основные характеристики прибора следующие:

- диапазон измеряемых скоростей, компоненты  $X, Y \pm 0,01 \dots 40$  м/с;
- погрешность измерения средней скорости, компоненты  $X, Y \pm 0,5\%$ ;
- статическая погрешность отслеживания спектрального пика доплеровского сигнала, не хуже  $\pm 0,1\%$ ;
- измерение скорости потока жидкости должно выполняться в измерительном объеме с частотой измерения до 30000 частиц в секунду;
- размер зондирующего оптического поля (не более)  $0,05 \times 1$  мм;
- шаг пространственного сканирования координатного механизма  $0,025$  мм, что позволяет выполнять пространственное сканирование области измерений с высоким разрешением;
- тип лазерного излучателя: полупроводниковый лазер с ограниченной степенью пространственной и временной когерентности.

Были выполнены измерения профилей скорости течения на 7 и 37-ми стержневых моделях имитаторах ТВС в одном и/или нескольких межканальных промежутках. В результате измерений определены распределения скорости течения жидкости, включая пульсационные значения, для сечений соседних ячеек имитатора ТВС. Для проведения экспериментов была проведена модернизация измерительных участков с установлением в качестве оптических окон прозрачных элементов.



### **3 Гидродинамика и теплообмен потока в тепловыделяющей сборке**

#### **3.1 Экспериментальные исследования в вертикальных сборках стержней**

##### **3.1.1 Описание экспериментальных стендов**

Были спроектированы два экспериментальных стенда, построенных по общей гидродинамической схеме. Один стенд рассчитан на течение жидкости через 7-ми стержневую, а другой через 37-ми стержневую модели ТВС. Каждый контур состоит из системы трубопроводов, расходомеров, рабочего участка, баков с рабочей жидкостью и измерительной аппаратуры. Схема работы стендов приведена на рисунке 4.

Подача жидкости из бака 1 осуществлялась циркуляционным насосом 2 в подводящий трубопровод. Расход жидкости измерялся с помощью расходомерной диафрагмы 3. Через входной коллектор 4, в котором была установлена система выравнивающих решеток, жидкость поступала в экспериментальную модель 5, 6, 7.

Схемы поперечного сечения экспериментальных моделей и общие виды рабочих участков приведены на рисунках 5, 6. Показаны шаг между стержнями  $S$  и диаметр стержней  $D$ , являющиеся ключевыми геометрическими характеристиками для гладких пучков твэлов. Поперечное сечение обечайки 7ми ячеечной экспериментальной модели изготовлено таким образом, что имитирует дополнительный пояс твэлов (квазипериодическая сборка). Диаметр стержней – имитаторов 9, 10 и 15 мм, относительный шаг расположения стержней в пучке 1,2, 1,3, 1,4, 1,45. Длина имитаторов твэлов 400 мм. Имитаторы твэлов позиционируются в рабочем участке посредством 7-ми ячеистых элементов дистанционирующих решеток. Толщина материала, из которого выполнены элементы ДР составляет 0,3 мм, высота ДР  $5 \div 30$  мм. По высоте рабочего участка имеется 3 пояса позиционирования стержней.

Для многостержневой сборки был спроектирован и изготовлен рабочий канал, выполненный из нержавеющей стали и имеющий в поперечном сечении форму, соответствующую 37-ми сложенных вместе шестиугольных ячеек с относительным шагом размещения 1,4. Диаметр стержней – имитаторов твэлов 9,1 мм. В этот канал может быть установлена решетка любого типа и конструкции. Общая длина модели 1200 мм. На рисунке 6 показаны фотографии обечаек 7 и 37 стержневых экспериментальных моделей.

Отвод жидкости от экспериментальной модели производился через выходной коллектор 8. В центральной части коллектора был установлен фланец 10 для герметичной установки

измерительных датчиков. Из выходного коллектора жидкость возвращалась обратно в основной бак через отводящий трубопровод 11. Расход жидкости определялся по перепаду давления на диафрагме и как и перепад давления в модели ТВС измерялся дифференциальными манометрами 12.

Расход жидкости во время проведения экспериментов регулировался изменением оборотов центробежного насоса с помощью частотного регулятора. Температура жидкости в баках поддерживалась постоянной с помощью автоматической системы термостабилизации в пределах  $25 \pm 0,1$  °C.

Основной объем экспериментов был проведен на многостержневой сборке, сборка с малым количеством стержней была использована для проведения дополнительных и уточняющих измерений. Расход жидкости через 37 ячейную модель-имитатор ТВС изменялся от 8,3 л/сек до 13,3 л/сек, что соответствовало диапазону изменения числа Рейнольдса от 40000 до 64000. При проведении испытаний сигналы с датчиков давления, температуры и измеряемой величины записывались через многоканальный АЦП Е14-140 на портативный компьютер.

Оптическая схема проведения измерений в 7-стержневой сборке методом ЛДИС и фотография рабочего участка приведены на рисунках 7 а, б. Проведение измерений локальных скоростей жидкости было выполнено вдоль линий 1 (продольный профиль скорости) и 2 (профиль скорости в двух соседних центральных ячейках), обозначенных на рисунке красным цветом. Шаг измерений скорости составлял от 0,5 мм. Эксперименты проведены с использованием воды в качестве модельного теплоносителя.

Использованы оптически прозрачные стенки рабочего участка, расположенные с внутренней и внешней сторон корпуса экспериментальной модели. Они показаны на рисунке линиями синего цвета. Для этих целей изготовлен сегмент рабочего канала из оргстекла высотой 20 мм. Для прохождения луча при исследовании в случае 2, один из имитаторов твэла был заменен на оптически прозрачный того же самого диаметра. Его положение обозначено на рисунке в виде круга синего цвета.

Для измерения поперечного распределения скорости течения в 37-ми стержневой сборке используется оптическая схема, приведённая на рисунках 8 а, б. Здесь возможно измерение вертикальной компоненты скорости вдоль всего сечения сборки (линия 1).

Прибор серии ЛАД-0х был установлен на координатно-позиционирующее устройство. При проведении работ были использованы двухкомпонентный прибор ЛАД-03 и

однокомпонентный ЛАД-08. Фотографии экспериментальных моделей во время проведения исследований приведены на рисунках 9 а, б.

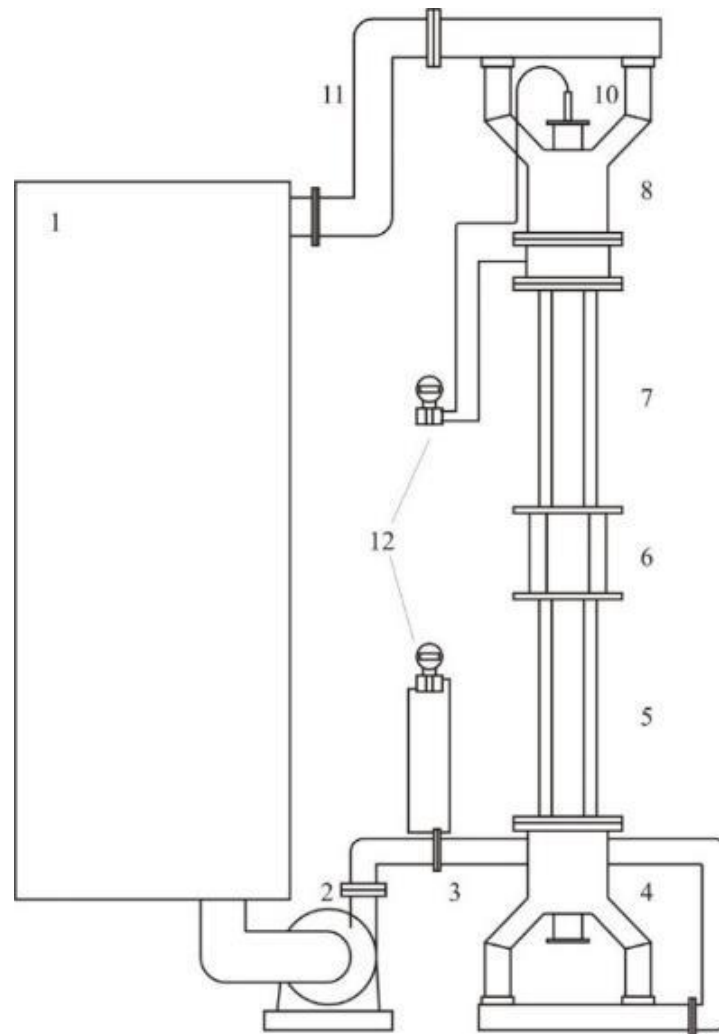


Рисунок 4 – Схема стенда.

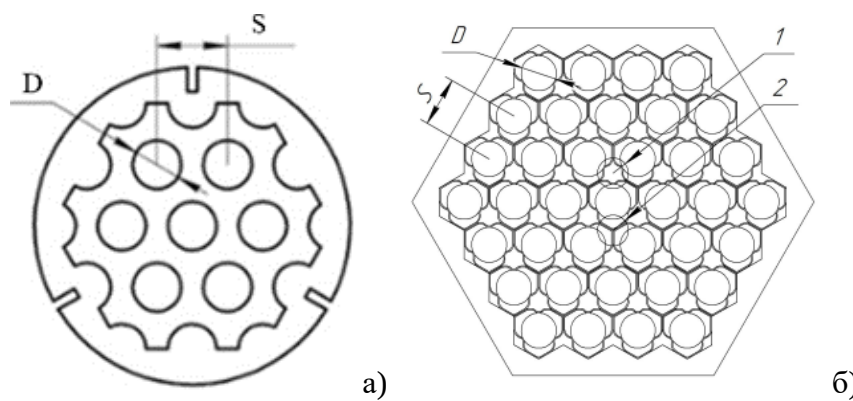


Рисунок 5 – Поперечное сечение 7ми стержневой (а) и 37 стержневой (б) экспериментальных моделей: 1 – «открытая» ячейка; 2 – «закрытая» ячейка.

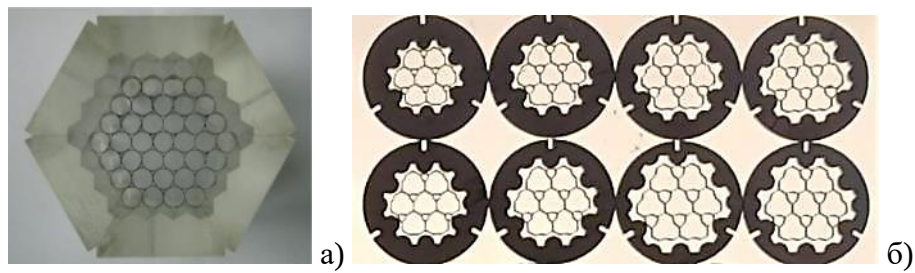


Рисунок 6 – Общий вид рабочего участка: а – 37ми стержневая сборка; б – 7ми стержневая сборка при вариации  $S/D$ .

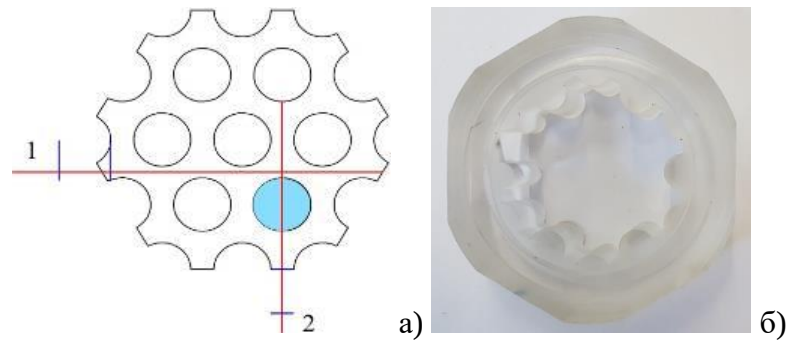


Рисунок 7 – Схема проведения измерений (а) и фотография участка для измерений скорости в 7ми стержневой сборке (б).

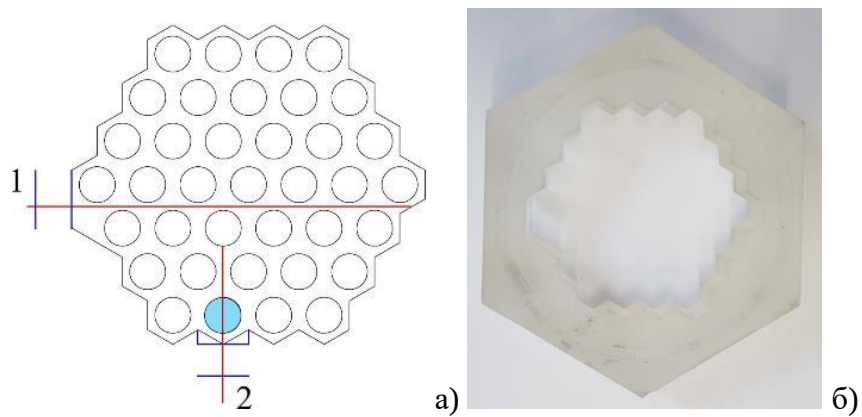


Рисунок 8 – Схема проведения измерений (а) и фотография участка для измерений скорости в 37ми стержневой сборке (б).

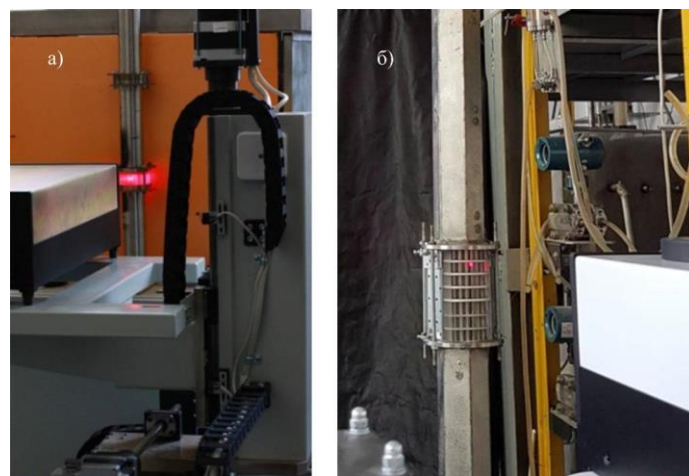


Рисунок 9 – Общий вид измерений скорости с использованием ЛДИС: а – сборка из 37 стержней; б – сборка из 7 стержней.

### 3.1.2 Перепад давления и гидравлическое сопротивление

Результаты измерений распределения давления приведены на рисунке 10 а. Вычислялся градиент давления и коэффициент трения  $\lambda_r$ . Зависимость  $\lambda_r(Re)$  приведена на рисунке 10 б. На этом же рисунке приведены значения коэффициента сопротивления для круглой трубы с аналогичным гидравлическим диаметром, вычисленные по формуле Блазиуса. Измеренные значения выше рассчитанных примерно на 15 %, что согласуются с литературными данными для пучков гладких стержней с относительным шагом 1,4 [15, 343]. Также проведено сравнение с корреляцией, предложенной в [344]:

$$\lambda_r = 0,59 Re^{-0,303} \quad (8).$$

Корреляция описывает экспериментальные данные с точностью порядка 10%.

Эмпирическая формула, основанная на большом количестве надежных экспериментальных данных и учитывающая влияние относительного шага на сопротивление гладкого пучка стержней, приведена в [87]:

$$\frac{\lambda_r}{\lambda_n} = 1 + \left(\frac{P}{D} - 1\right)^{0,32} \quad (9),$$

где  $\lambda_n$  – коэффициент гидравлического сопротивления плотного пучка труб [5]:

$$\lambda_n = 0,21 Re^{-0,25} \quad (10).$$

Предложенная корреляция с точностью до  $\pm 3\%$  описывает результаты измерений.

Зависимость коэффициента трения в гладком пучке стержней  $\lambda_r$  от относительного шага между их центрами ( $S/D$ ) в турбулентном режиме течения приведена на рисунке 11 а. Проведено сравнение с эмпирической корреляцией [87]. Расчет описывает экспериментальные данные с точностью порядка 10%.

Важным вопросом при течении теплоносителя в ТВС является азимутальная неравномерность распределения локальных гидродинамических параметров потока в межтрубном пространстве. Проведено детальное исследование с вариацией диаметра стержней, относительного шага между ними, режима течения. Распределение относительного напряжения трения на стенке  $\tau/\tau_0$  при ламинарном режиме течения и вариации геометрических параметров ( $D$ ,  $S/D$ ) приведено на рисунке 11 б. Линией показаны расчетные данные [345]. При  $S/D = 1,2$  наблюдается достаточно большая неравномерность в распределении  $\tau$ , достигающая величины порядка 20 %. Увеличение  $S/D$  приводит к более равномерному распределению  $\tau$ . Изменение  $D$  практически не влияет на описанную выше картину.

Проведены детальные измерения коэффициента гидравлического сопротивления ДР разных типов. Для получения представительных данных использовалось от 6 до 8 37 ячейных фрагментов решеток одной и той же конструкции. Для каждой из решеток измерения многократно повторялись, включая процесс сборки/разборки экспериментальной модели. Эпюры падения давления на участке ЭМ с ДР высотой 30 мм приведены на рисунках 12 а, б. Эксперименты были проведены при  $Re=52000$ . Положение решеток показано на диаграммах с помощью прямоугольников серого цвета.

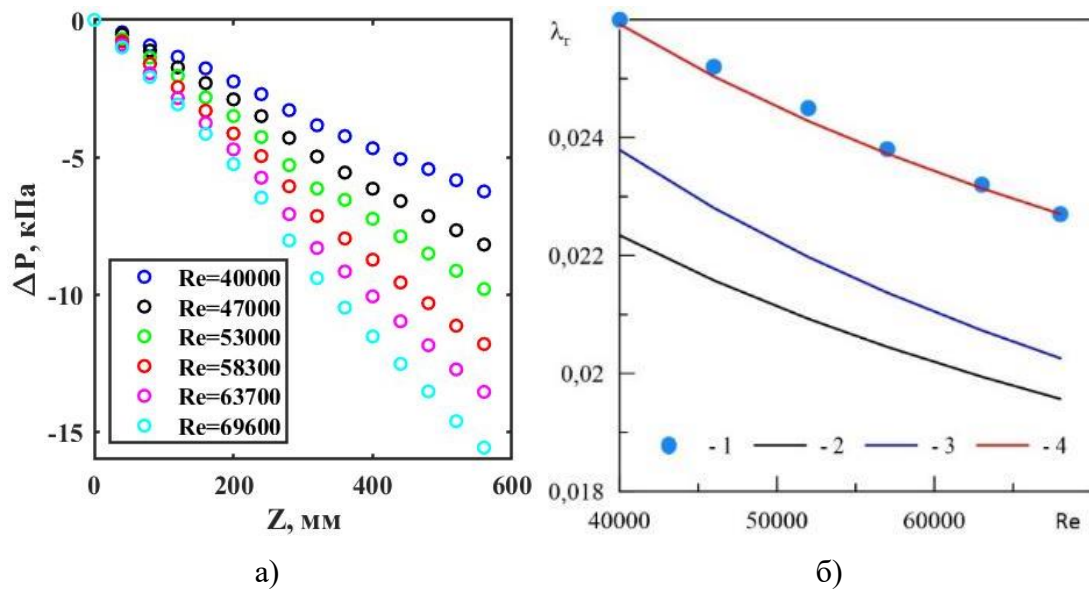


Рисунок 10 – Перепад давления на пучках стержней имитаторов твэл (а); коэффициент сопротивления пучка стержней – имитаторов твэл (б): 1 – эксперимент; 2 – расчет по формуле Блазиуса; 3 – расчет по корреляции [344]; 4 – расчет по корреляции [87].

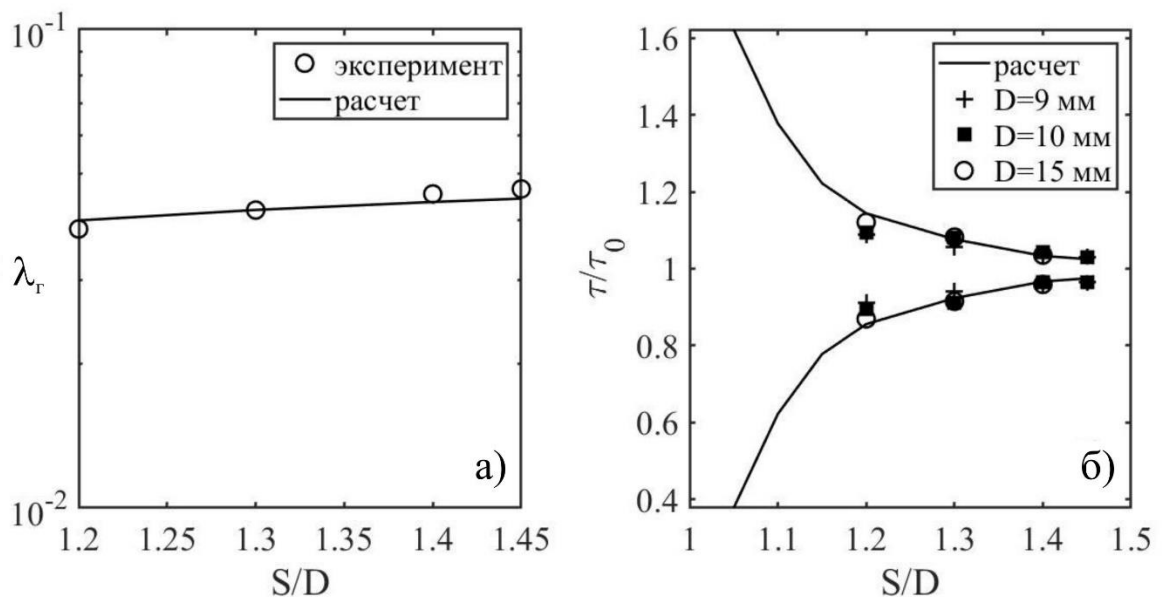


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента трения (а) и азимутальной неравномерности касательных напряжений (б) от относительного шага в пучке стержней.

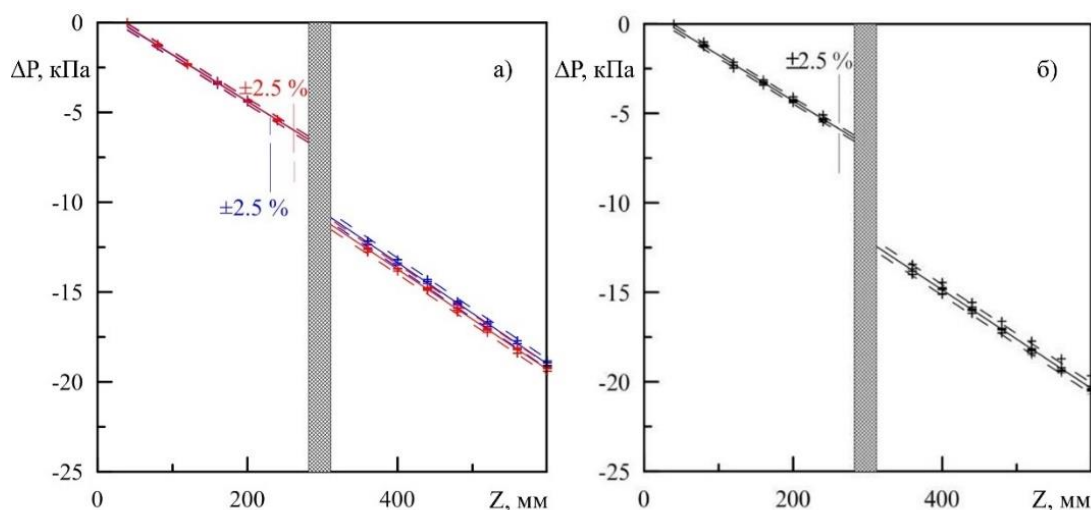


Рисунок 12 – Перепад давления на решетках одинаковой конструкции высотой 30 мм: а – толщина материала решетки 0,25 мм; б – 0,3 мм.

На решетках наблюдается значительный перепад давления, гидравлические потери существенно выше, чем в гладком пучке стержней. Как можно видеть из диаграмм, для массивов экспериментальных данных отклонение результатов не превышает 2,5%. При одинаковой конструкции и высоте ДР влияние на гидравлику оказывает толщина материала решетки. Однако степень влияния площади затенения на гидравлику потока значительно ниже, чем предсказания по модели, предложенной в [6]. С помощью разработанной системы сканирования с высоким пространственным разрешением геометрических особенностей ДР было показано, что это может быть связано с появлением зазоров в месте стыка и сварки трех прилегающих друг к другу сот.

Сводные диаграммы, показывающие зависимость коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi$  от числа Рейнольдса потока приведены на рисунке 13. Эксперименты проведены для дистанционирующих решеток с высотой  $L_{\text{реш}}=25$  мм и толщиной материала  $\sigma_{\text{реш}}=0,25$  мм (ДР1) и  $L_{\text{реш}}=30$  мм и  $\sigma_{\text{реш}}=0,3$  мм (ДР2).

Одной из наиболее часто используемой корреляций по зависимости коэффициента гидравлического сопротивления ДР от  $Re$  является модель Rehme [15, 16, 112] в виде:

$$\xi = K_{\text{реш}} \epsilon^2 \quad (11),$$

Где  $K_{\text{реш}}$  – коэффициент, изменяющийся в пределах  $6 \div 7$ ,

$$\epsilon = \frac{A_{\text{реш}}}{A_{\text{кан}}} \quad (12),$$

где  $A_{\text{реш}}$  – площадь проекции дистанционирующей решетки,  $A_{\text{кан}}$  – не затененная площадь проходного сечения канала.

Позднее в работе [346] предложена корреляция для определения коэффициента  $K_{\text{реш}}$ :

$$K_{\text{реш}} = \text{МИН} \left[ 3,5 + \frac{73,14}{Re^{0,264}} + \frac{2,79 \times 10^{10}}{Re^{2,79}}, \frac{2}{\epsilon^2} \right] \quad (13),$$

а в работе [347] предложено дополнение к этой модели в виде:

$$K_{\text{реш}} = \text{МИН} \left[ 3,5 + \frac{73,14}{Re^{0,264}} + \frac{2,79 \times 10^{10}}{Re^{2,79}}, \frac{2,6}{\epsilon^2} \right] \quad (14),$$

где на основе экспериментальных данных изменено максимально возможное значение коэффициента.

В работе [111] приведены значения  $K_{\text{реш}}$  для решеток с разной высотой, однако какой-либо зависимости от числа Рейнольдса не представлено. Приведены данные, что для решеток с высотой 20 мм значение коэффициента находится в пределах 7,3÷13,9, а для решетки высотой 25 мм – в пределах 9,5÷11,5. Модель, учитывающая как затенение, так и высоту ДР, приведена в справочнике Идельчика [348].

Сравнение расчетов и экспериментальных данных приведено на рисунке 13. Экспериментальные данные приведены в виде точек, расчетные – в виде линий. Данные для ДР1 приведены на рисунке красным цветом, ДР2 – синим цветом. Наиболее корректно полученные данные описываются корреляциями, приведенными в [348]. Отклонения экспериментальных и расчетных данных не превышает 10%. Данные [346] (приведены на рисунке в виде пунктирных линий) показывают существенную недооценку экспериментальных данных, отклонение достигает 30÷40%. Корреляции, предложенные [111], показаны на рисунке, как области, закрашенные соответствующим цветом. Полученные в экспериментах данные лежат внутри этих областей, однако существует большая неопределенность для определения КГС.

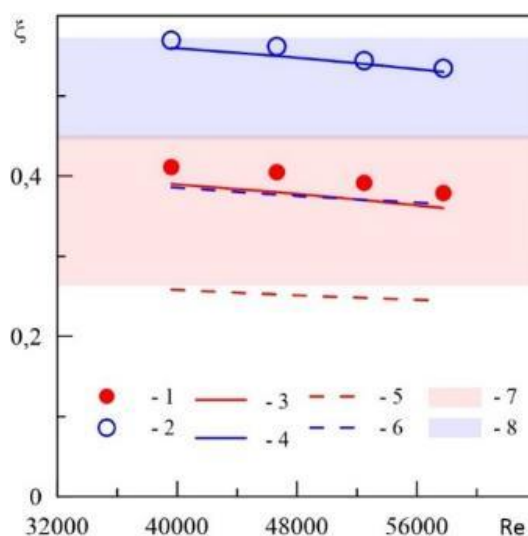


Рисунок 13 – Коэффициент гидравлического сопротивления ДР: 1, 2 – экспериментальные данные для ДР1 и ДР2, 3, 4 – расчеты по корреляции [348]; 5, 6 – расчеты по корреляции [346], 7, 8 – данные [111].



### **3.1.3 Данные по влиянию расстояния между дистанционирующими и перемешивающими решетками на коэффициент гидравлического сопротивления**

В ТВС РУ с водяным теплоносителем наряду с дистанционирующими решетками применяются перемешивающие решетки. Основным предназначением подобных решеток является увеличение запаса до кризиса теплообмена при более равномерном распределении температуры по сечению ТВС.

Были проведены исследования гидравлического сопротивления и влияния ПР различных конструкций на распределение скорости жидкости, локальные коэффициенты трения и теплообмена. Важным вопросом являлось также определение коэффициента сопротивления системы решеток ДР+ПР в зависимости от расстояния между ними.

Экспериментальная модель ТВС конфигурировалась следующим образом (см. рисунок 14). На расстояниях 50, 300 и 1150 мм от входа в рабочий участок устанавливались дистанционирующие решетки типа МТВС, на расстоянии 640 мм от входа в рабочий участок устанавливалась тестируемая перемешивающая решетка. Дистанционирующая решетка ДР2 устанавливалась выше ПР по потоку на расстоянии  $L=0\div 120$  мм от ПР.

На рисунке 15 а-д представлены распределения перепада давления по длине для различных значений скорости жидкости и расстояниях между решетками 0, 20, 40, 80 и 120 мм, соответственно. Результаты измерений перепада давления на решетках, полученные при  $Re = 63700$ , приведены на рисунке 15 е, для различных расстояний между решетками.

При расчете суммарного КГС участок сборки между решетками исключался из суммарного перепада давления (см. рисунок 16). В результате показано, что  $\xi$  системы решеток близко сумме сопротивлений отдельных ДР и ПР. Подобные зависимости ведут себя аналогичным образом для систем, включающих разные типы ПР. Поэтому вопрос об оптимальном расстоянии между двумя решетками должен решаться с других позиций и, прежде всего, учитывая длину возмущений, вносимых в поток дистанционирующей решеткой. Это, в свою очередь, влияет на суммарный коэффициент теплообмена между поверхностью стрижня – имитатора твэла и потоком однофазной жидкости. Учитывая данные измерений по длине возмущений, вносимых в поток ДР ТВС-1200, можно рекомендовать устанавливать перемешивающую решетку на расстояниях не более  $30\div 60$  мм от дистанционирующей. Оптимальным было бы сочетание в одной решетке функций дистанционирования и перемешивания.

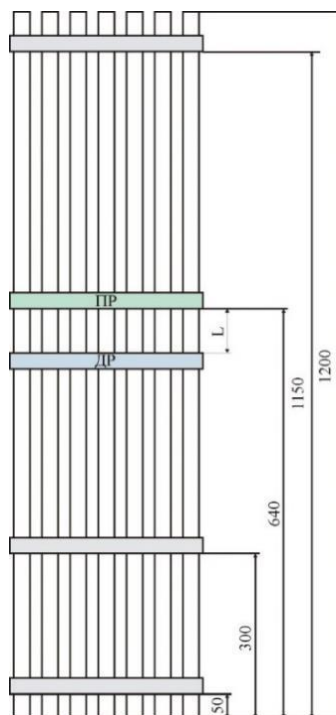


Рисунок 14 – Схема размещения решеток в 37-ячеечной сборке имитаторов ТВЭЛОВ.

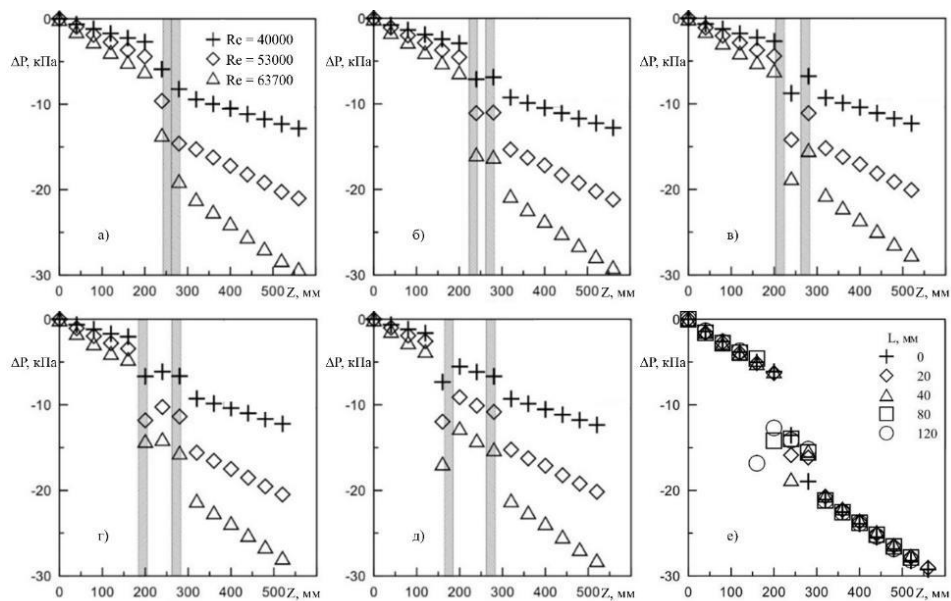


Рисунок 15 – Перепад давления при вариации расстояния между ДР и ПР: а - 0 мм; б - 20 мм; в - 40 мм; г - 80 мм; д - 120 мм; е – обобщенный график при  $Re = 63700$ .

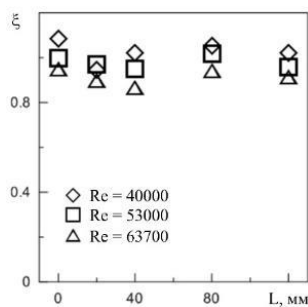


Рисунок 16 – Зависимость общего коэффициента гидравлического сопротивления от расстояния между ДР и ПР.

### **3.1.4 Распределение касательных напряжений на стенке имитатора твэла**

Для проведения калибровки электродиффузионных датчиков трения было изготовлено калибровочное устройство. Рабочим участком являлась трубка из оргстекла с внутренним диаметром 12 мм длиной 0,2 м. В трубу соосно помещался измерительный блок с датчиками трения, что образовывало кольцевой канал. На наружную трубу монтировались два коллектора, через которые производилась подача жидкости в кольцевой канал и отвод жидкости. Жидкость из коллекторов подавалась в кольцевой канал через 24 отверстия диаметром 2,5 мм, расположенных в два ряда равномерно по окружности трубы. Жидкость из основного бака гидродинамического контура подавалась с помощью центробежного насоса 4 типа САМ 198/РА, расход жидкости измерялся расходомерной диафрагмой и регулировался вентилями. Из верхнего коллектора жидкость сливалась в основной бак. В процессе калибровки проводилось изменение расхода жидкости через кольцевой канал и регистрировались осредненные значения выходных напряжений усилителей. После этого определялись калибровочные зависимости для датчиков трения, которые использовались далее при измерениях.

### **3.1.5 Влияние дистанционирующих решеток на распределение касательных напряжений**

Проведение измерений локального напряжения трения на стенке имитатора твэла при обтекании потоком жидкости в сборке – имитаторе ТВС позволяет оценить вклад турбулентного и конвективного переноса на интенсификацию процессов переноса импульса и тепла при наличии и отсутствии дистанционирующих решеток, а также характер и длину пути затухания возмущающего воздействия решеток различного типа. При измерениях использовались те же ДР, те же стержни – имитаторы твэл, что и при проведении работ по измерению КГС.

Измерения проводились на модели сборки с 37 стержнями – имитаторами твэл. В связи с тем, что электродиффузионный датчик трения является локальным, его показания изменялись при вращении измерительной трубки. При измерениях с дистанционирующими решетками в каждом положении по высоте производилось измерение локального трения по периметру трубы.

Осредненные по угловой координате значения напряжения трения на стенке представлены на рисунке 17 для ДР1 и ДР2. Для каждого расхода жидкости значение осредненного трения было отнесено к соответствующему значению в гладком пучке стержней. Измерения производились на расстояниях  $Z$  от 250 мм выше до 250 мм ниже решетки по потоку. В набегающем потоке больших возмущений не выявлено. В целом для всех исследованных

решеток наблюдается качественное соответствие поведения осредненных относительных значений касательных напряжений в зависимости от расстояния до решетки. Для различных типов дистанционирующих решеток наблюдается достаточно быстрое затухание возмущения по длине (см. рисунок 18 а). На расстоянии около 80 мм после решетки локальное трение возвращается к своему невозмущенному значению. След за ПР продолжается на значительно больших расстояниях (см. рисунок 18 б).

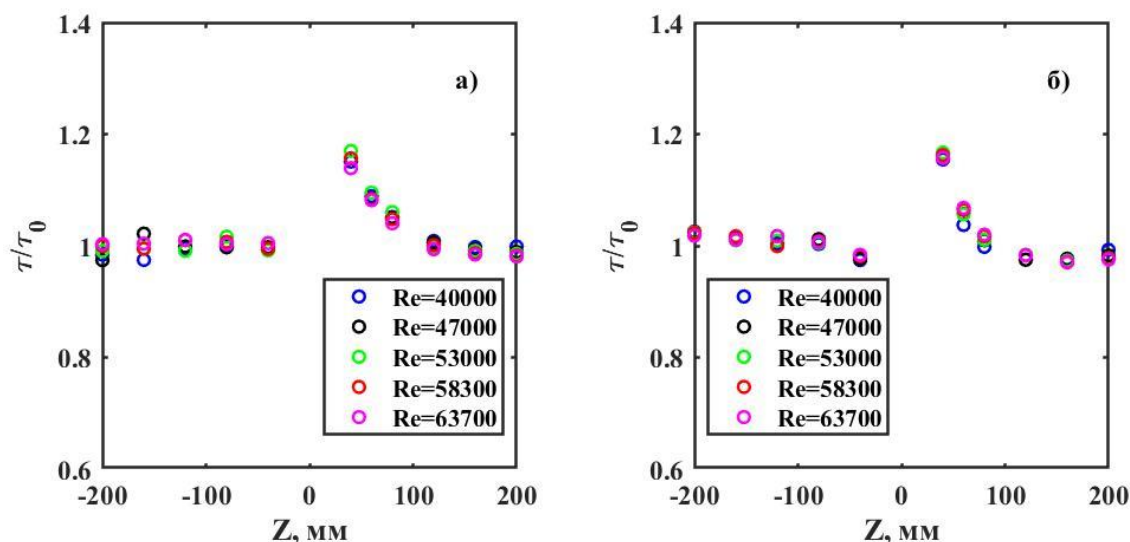


Рисунок 17 – Распределение относительного трения для сотовых ДР.

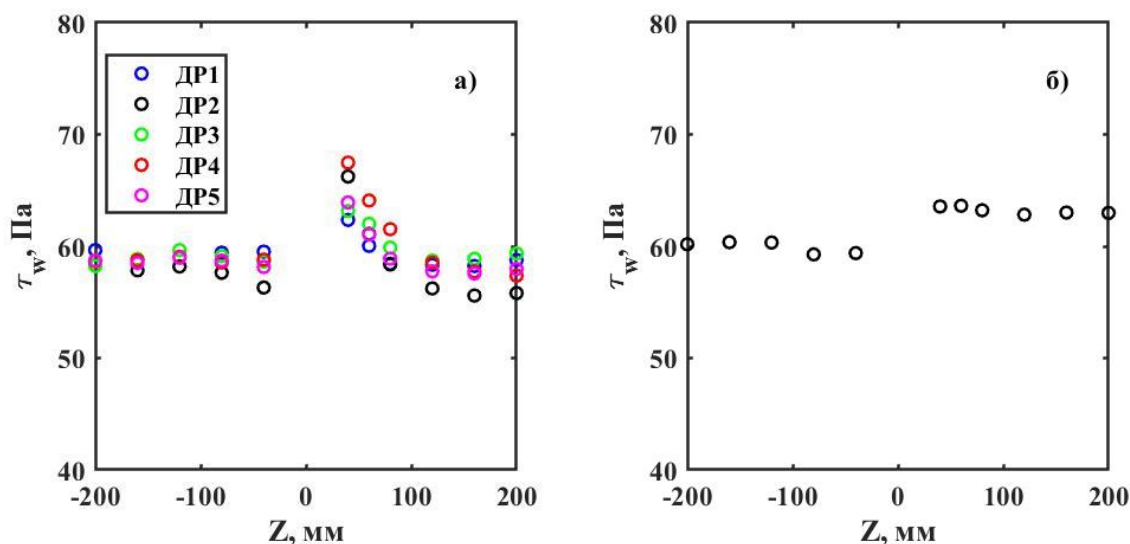


Рисунок 18 – Осредненное по окружности напряжение трения на стенке для сотовых ДР различной геометрии (а) и перемешивающей решетки (б) при  $Re = 63700$ .

### 3.1.6 Данные по теплообмену за дистанционирующей решеткой

Проведены исследования теплообмена от нагреваемого центрального стержня сборки к потоку при  $Re = 40000$ . Данные о коэффициенте теплопроводности сплава ЭП110 приведены в

[349]. Для расчета коэффициента теплообмена в гладком пучке стержней использовалась формула [350]:

$$Nu = K Re^{0,8} Pr^{0,33} \quad (15),$$

где коэффициент  $K$  для гексагональной сборки стержней определяется по формуле:

$$K = 0,026 \left( \frac{S}{D} \right) - 0,006 \quad (16).$$

Экспериментальные данные о распределении коэффициента теплообмена в гладком пучке стержней  $Nu_0$  описываются с помощью приведенной формулы с точностью не хуже  $\pm 5\%$ .

Приведены распределения относительного числа Нуссельта ( $Nu$ ) для ДР1 и ДР2. Измерения проводились на расстояниях от 10 до 160 мм за решетками с шагом 10 мм. Непосредственно за решетками наблюдается неравномерное распределение коэффициента теплообмена в зависимости от азимутальной координаты и его интенсификация в отрывной области потока за решеткой, о чем говорит отношение  $Nu/Nu_0$  выше единицы. С увеличением расстояния от решетки неоднородность распределения коэффициента теплообмена исчезает. Это происходит на расстоянии порядка  $4\div 5$  эквивалентных диаметров от решетки. При этом большее возмущение потока решеткой (более высокие  $\sigma_{реш}$  и  $L_{реш}$ ), приводит к более высокому пиковому значению и увеличению длины затухания возмущений.

На больших расстояниях от решеток распределения теплообмена становятся практически осесимметричными. С увеличением расстояния от решетки наблюдаются значения коэффициента теплообмена, характерные для невозмущенного потока в пучке стержней. Данные о некотором ухудшении теплообмена в области средних расстояний от решетки подтверждаются приведенными выше зависимостями для касательных напряжений. Видимо, это вызвано особенностями установления потока [74].

На рисунке 19 приведено сравнение экспериментальных данных с предложенными в литературе корреляциями (см. таблицу 6) для оценки коэффициента теплообмена за решеткой. Предложены корреляции для конкретных геометрий ДР, которые отличаются от используемых в отечественных реакторах. Как можно видеть, большинство приведенных в литературе корреляций некорректно описывает зависимость  $(Nu/Nu_0)/(x/D)$  для ДР реактора ВВЭР. Возможно, это связано с более сложной конструкцией дистанционирующих элементов (наличие пружин, дефлекторов и т.д.). Пиковое значение  $Nu$  связано со степенью затенения потока решеткой, что объясняет более высокие значения коэффициента теплообмена за ДР2.

Таблица 6 – Корреляции для определения влияния ДР на теплообмен

| Источник | Корреляция                                                                              |      |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| [351]    | $\frac{Nu}{Nu_0} = 1 + 5,5\epsilon^2 e^{-0,13x/D}$                                      | (17) |
| [73, 74] | $\frac{Nu}{Nu_0} = 1 + 6,5\epsilon^2 e^{-0,8x/D}$                                       | (18) |
| [352]    | $\frac{Nu}{Nu_0} = 1 + 465,4Re^{-0,5}\epsilon^2 e^{-7,31 \times 10^{-6} Re^{1,15} x/D}$ | (19) |
| [353]    | $\frac{Nu}{Nu_0} = 1 + (3,58 + 10^{-5} Re)\epsilon^{0,47 \ln(Re) - 3,32} e^{-0,13x/D}$  | (20) |
| [81]     | $\frac{Nu}{Nu_0} = 1 + 2,86\epsilon^2 e^{-0,12x/D}$                                     | (21) |
| [52]     | $\frac{Nu}{Nu_0} = 1 + 6,72\epsilon^2 e^{-\frac{0,12x}{D} - 1}$                         | (22) |

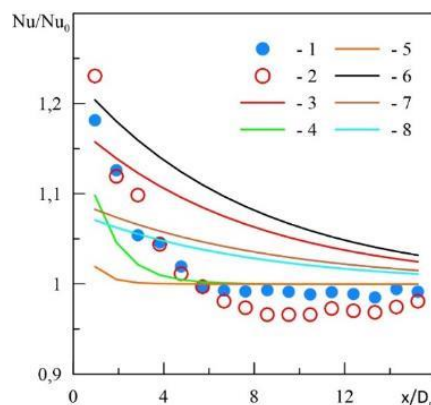


Рисунок 19 – Распределение среднего коэффициента теплообмена за решеткой: 1 – эксперимент ДР1; 2 – эксперимент ДР2; 3 – расчет по уравнению (17); 4 – расчет по уравнению (18); 5 – расчет по уравнению (19); 6 – расчет по уравнению (20); 7 – расчет по уравнению (21); 8 – расчет по уравнению (22).

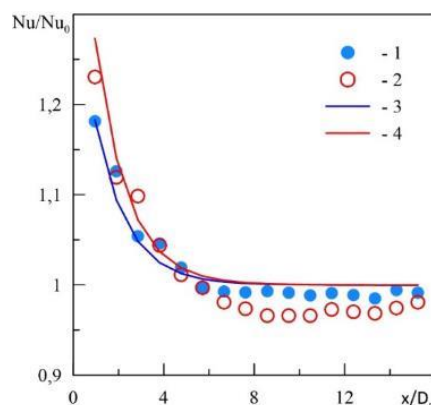


Рисунок 20 – Распределение среднего коэффициента теплообмена за решеткой: 1 – экспериментальные данные ДР1; 2 – экспериментальные данные ДР2; расчет для ДР1 по уравнению (23); расчет для ДР2 по уравнению (23).

Наиболее точно закономерности изменения теплообмена за решеткой описываются зависимостью, предложенной в [73, 74]. Однако наблюдаются достаточно большие отклонения расчета по модели от экспериментальных данных в отрывной области потока. Проведена аппроксимация экспериментальных данных и предложена корреляция:

$$\frac{Nu}{Nu_0} = 1 + 11\epsilon^2 e^{-0,7x/D} \quad (23).$$

Результаты сравнения с новой корреляцией приведены на рисунке 20. Данная корреляция описывает результаты экспериментов с точностью порядка 5%.

### 3.1.7 Данные по распределению осевой скорости за ДР

Зависимость азимутального распределения относительной скорости жидкости от расстояния от ДР1-ДР5, приведены на рисунках 21 - 25 соответственно. Здесь  $u_0$  – осредненная осевая скорость в гладком пучке твэлов. В непосредственной близости от решетки наблюдается существенная неравномерность в распределении скорости жидкости. Максимальное и минимальное значение регистрируемой скорости в этой области отклоняются от среднего более чем на 20%. Заметно формирование шести ярко выраженных «струй», которые образуются в пространстве между поверхностью имитатора твэла и внутренней поверхностью ячейки и в отверстиях, образующихся при сложении ячеек. С увеличением расстояния от решетки происходит выравнивание распределения скорости жидкости. На расстояниях свыше 60÷80 мм от решетки влияние решетки на поток практически нивелируется.

Таким образом, имеет место значительная неравномерность в распределении скорости по азимутальной координате в области непосредственно после решетки. По мере удаления от решетки эта неравномерность сглаживается. Особенностью распределения скорости за ДР является наличие «лепестков» при малых расстояниях от решетки, что вызвано геометрическими особенностями строения решеток. Распределения скорости для ДР с разной конструкцией качественно соответствует.

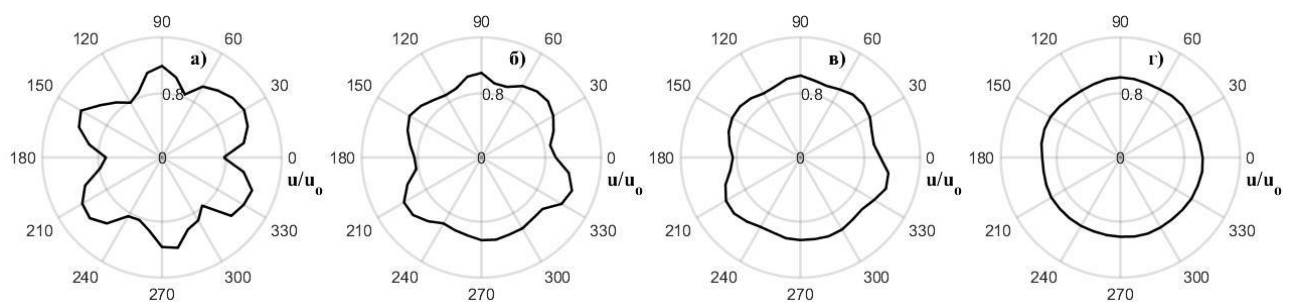


Рисунок 21 – Азимутальное распределение относительной осевой скорости за ДР1:  
а –  $Z/D = 1$ ; б –  $Z/D = 3$ ; в –  $Z/D = 5$ ; г –  $Z/D = 9$ .

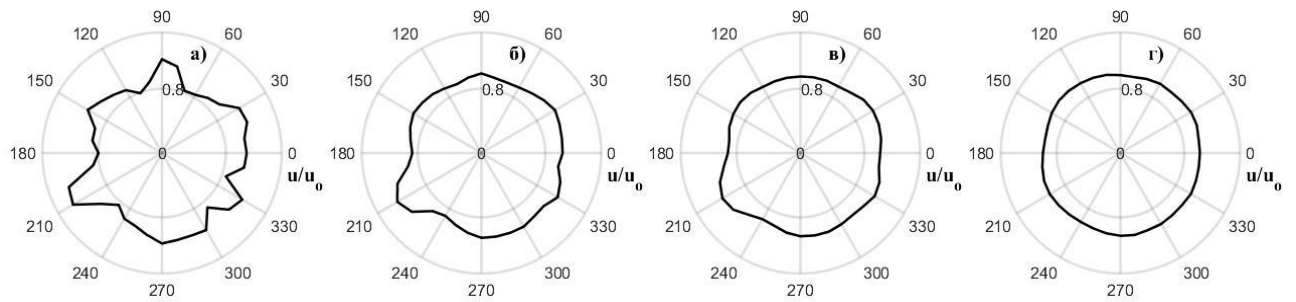


Рисунок 22 – Азимутальное распределение относительной осевой скорости за ДР2:  
а –  $Z/D = 1$ ; б –  $Z/D = 3$ ; в –  $Z/D = 5$ ; г –  $Z/D = 9$ .

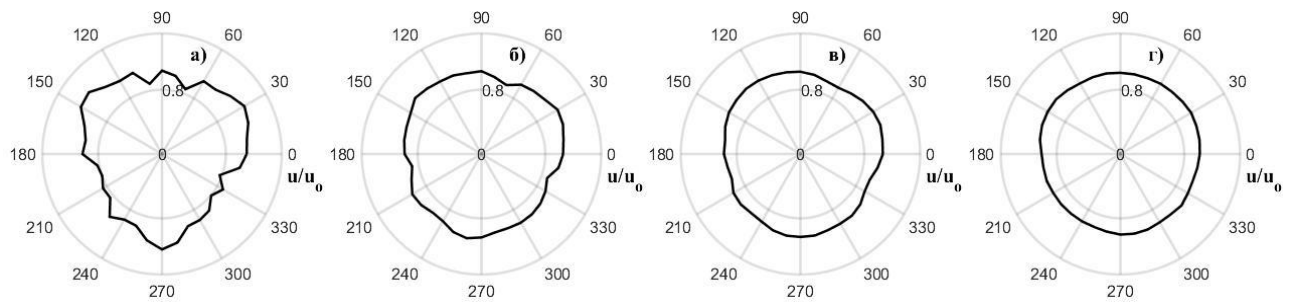


Рисунок 23 – Азимутальное распределение относительной осевой скорости за ДР3:  
а –  $Z/D = 1$ ; б –  $Z/D = 3$ ; в –  $Z/D = 5$ ; г –  $Z/D = 9$ .

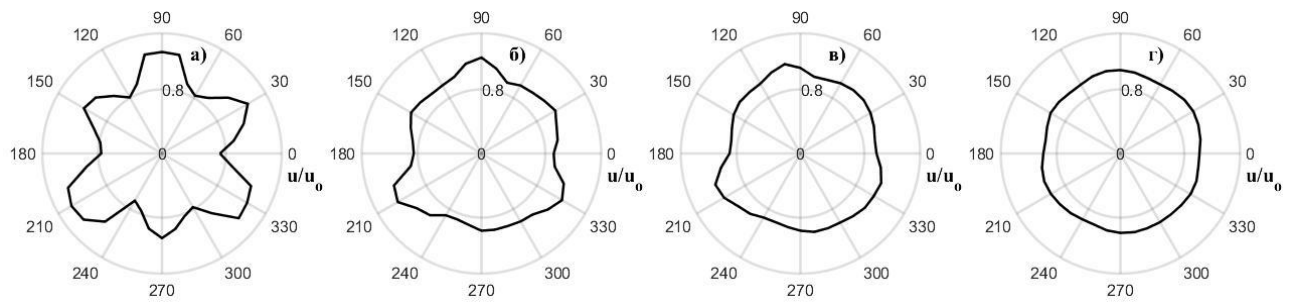


Рисунок 24 – Азимутальное распределение относительной осевой скорости за ДР4:  
а –  $Z/D = 1$ ; б –  $Z/D = 3$ ; в –  $Z/D = 5$ ; г –  $Z/D = 9$ .

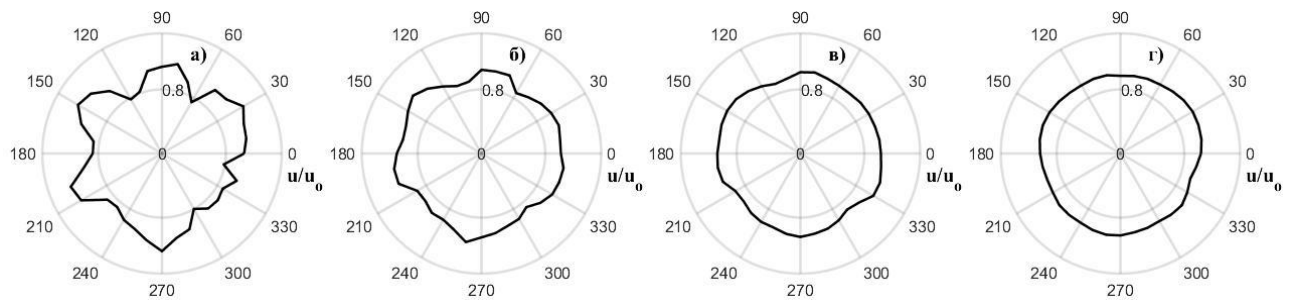


Рисунок 25 – Азимутальное распределение относительной осевой скорости за ДР5:  
а –  $Z/D = 1$ ; б –  $Z/D = 3$ ; в –  $Z/D = 5$ ; г –  $Z/D = 9$ .



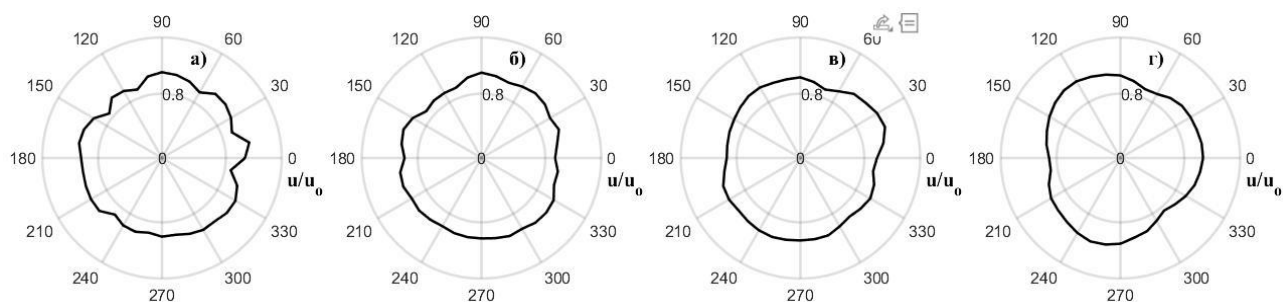


Рисунок 26 – Азимутальное распределение относительной осевой скорости за ПР:  
а –  $Z/D = 1$ ; б –  $Z/D = 3$ ; в –  $Z/D = 5$ ; г –  $Z/D = 9$ .

Отличием потока теплоносителя за перемешивающей решеткой является развитие неравномерности распределения осевой скорости на достаточно больших расстояниях от решетки (см. рисунок 26). Было установлено, что подобная неравномерность может распространяться на расстояния более 300 мм от различных вариантов перемешивающих решеток.

Выполнены измерения профилей скорости течения водяного теплоносителя на 7 и 37-ми стержневых моделях имитаторах ТВС в одном и/или нескольких межканальных промежутках. Шаг измерений скорости составляет от 0,5 мм.

Эксперименты обозначены следующим образом:

- В\_7Т\_1 – измерение скорости вдоль линии 1 (см. рисунок 7);
- В\_7Т\_2 – измерение скорости вдоль линии 2 (см. рисунок 7);
- В\_37Т\_1 - измерение скорости в 37-ми ячеистом фрагменте ТВС (см. рисунок 8)

Результаты измерений для случая В\_7Т\_1 приведены на рисунках 27. Эксперименты проводились при числах Рейнольдса потока 8000, 16000 и 24000 [354]. Приведены зависимости измеряемой величины от относительной координаты. При этом  $Y$  равняется длине той части линии 1, которая попадает в сечение сборки.  $Y_1$  - длина части линии 2 между соседними стержнями. Отсчет координат ведется от места заведения измерительного объема лазера вглубь сборки.

Непосредственно за решеткой наблюдается возмущение течения, что выражается в большой степени неоднородности распределения скорости жидкости ( $u$ ) и ее относительных пульсаций ( $u'/u$ ) вдоль линии измерения. Изменение числа Рейнольдса в 3 раза не приводит к значительному изменению относительных величин. Наибольшее значение скорости наблюдается вблизи стенок канала, в центральной области скорость несколько ниже.

То же можно сказать о поведении пульсационных характеристик. Возмущение потока приводит к высокому уровню пульсаций скорости жидкости, среднее значение  $u'/u$  около 0,15.

Увеличение расстояния от решетки приводит к выполаживанию профиля скорости жидкости. При этом значительно уменьшается амплитуда пиковой скорости. Уровень пульсаций скорости жидкости также уменьшается, среднее значение  $u'/u$  около 0,1.

Данные измерений (B\_37T\_1) приведены на рисунках 28. Для получения аналогии с 7ми стержневой сборкой, число Рейнольдса при проведении экспериментов равнялось 8000. Измерения выполнены на расстояниях от решетки 15, 30, 50 и 100 мм. Полученные данные находятся в хорошем соответствии с результатами, полученными в семи стержневой сборке. Уровень относительных пульсаций скорости жидкости находится в диапазоне от 0,05 до 0,2.

При увеличении  $Z$  до 30 мм, профиль скорости в центральной части сечения практически выравнивается. Небольшое снижение наблюдается в области расположения визуализационного окна. Профиль  $u'/u$  также становится более пологим, средние значения относительных пульсаций скорости падают до  $\sim 0,1 \div 0,11$ .

При дальнейшем увеличении расстояния от расположения решетки наблюдается выполаживание профиля скорости жидкости в центральной части канала, что соответствует течению в полномасштабной сборке твэлов. Относительные пульсации скорости жидкости также становятся более равномерными по сечению сборки. Средние значения пульсации скорости снижаются до уровня  $0,06 \div 0,08$ .

Данные, полученные в компоновке B\_7T\_2 приведены на рисунках 29. Как и в предыдущем случае, непосредственно за решеткой наблюдается большое возмущение потока, выражающееся в формировании двух ярко выраженных пиков распределения скорости. Расположение этих пиков находится в хорошем соответствии с расположением конструктивных особенностей решетки («открытые» и «закрытые» каналы), где примерно в середине области измерений находится затеняющий элемент. Как и в предыдущем случае, среднее значение  $u'/u$  около 0,15, наблюдается большая неравномерность распределения этой величины. Увеличение расстояния от решетки приводит к выполаживанию профилей скорости жидкости и снижению уровня турбулентных пульсаций до значений примерно  $0,07 \div 0,08$ . Таким образом, наблюдается хорошее соответствие восстановления гидродинамической структуры потока после взаимодействия с дистанционирующей решеткой в 7 и 37 стержневых сборках.

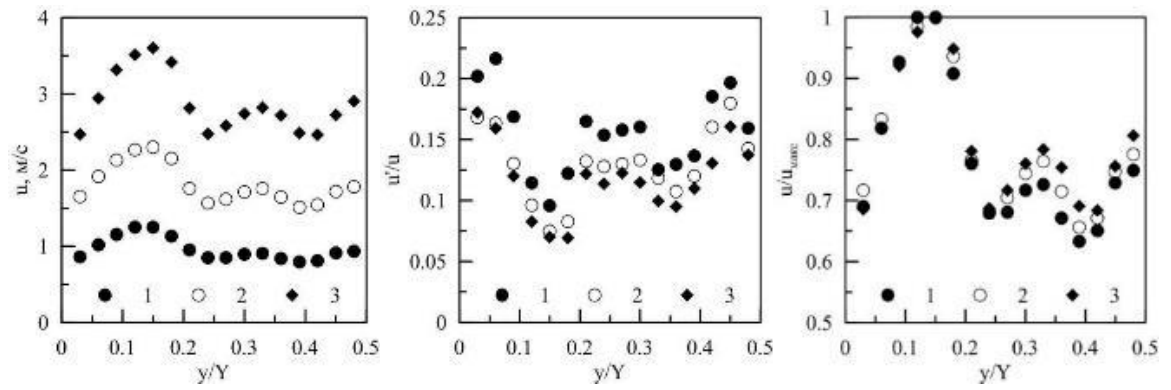
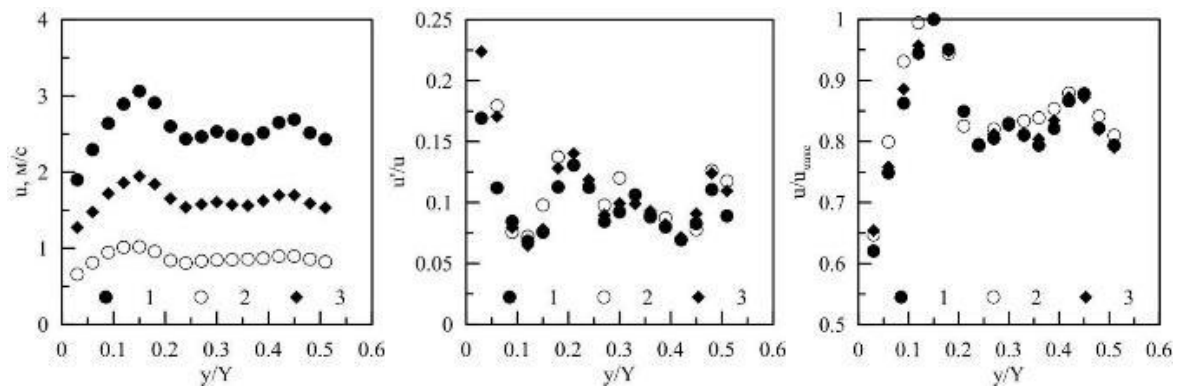
(a)  $Z = 20$  мм(б)  $Z = 60$  мм

Рисунок 27 – Распределение гидродинамических параметров потока: 1 -  $Re = 8000$ ; 2 -  $Re = 16000$ ; 3 -  $Re = 24000$ .

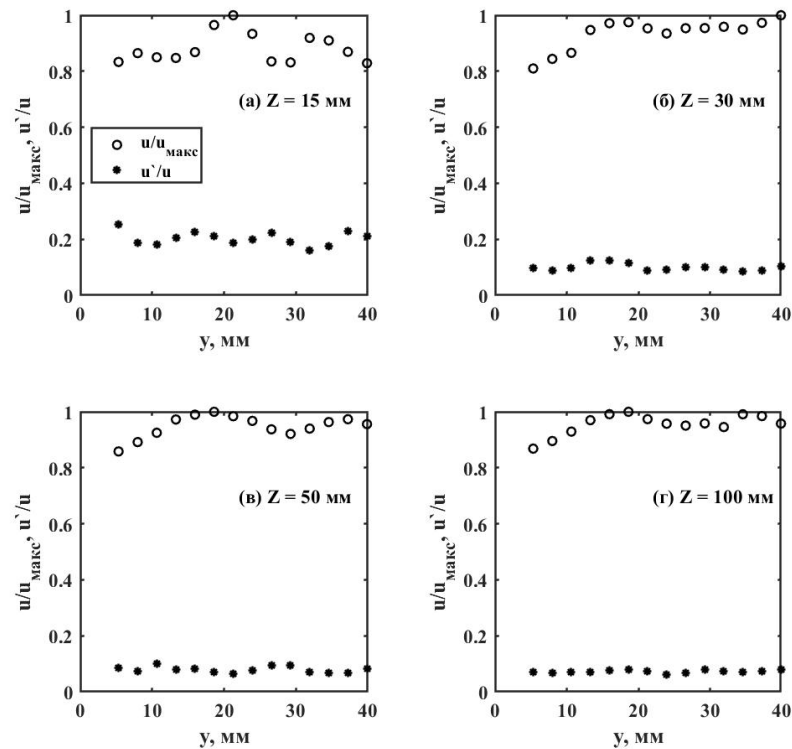


Рисунок 28 – Распределение гидродинамических характеристик на разных расстояниях от ДР, эксперимент В\_37Т\_1.

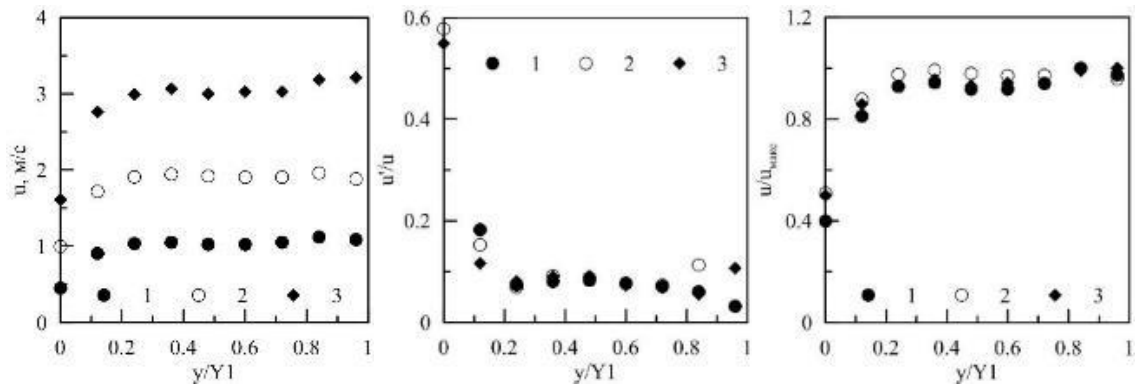
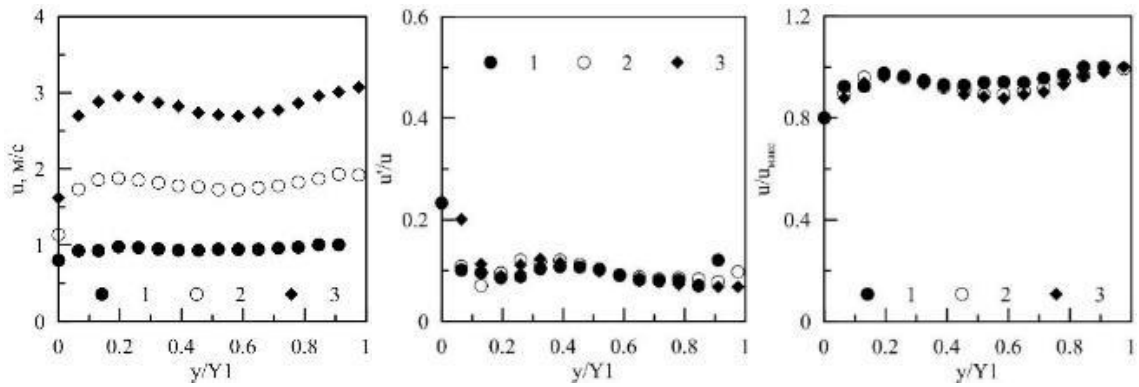
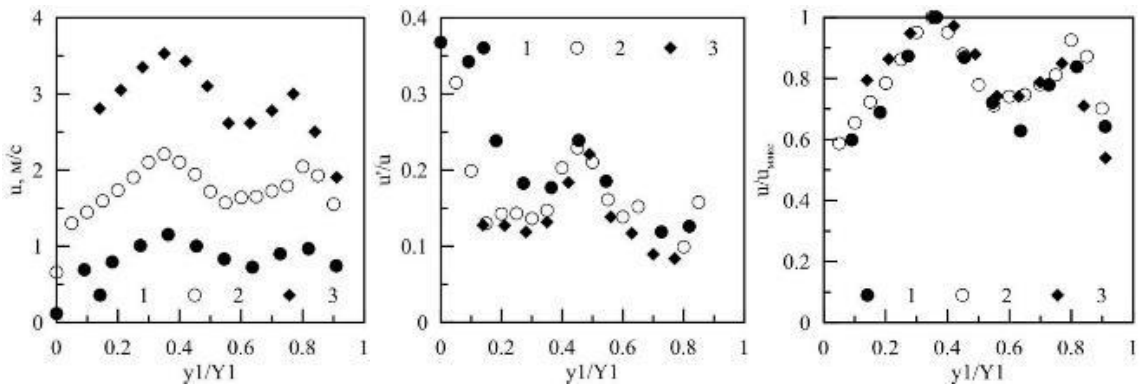
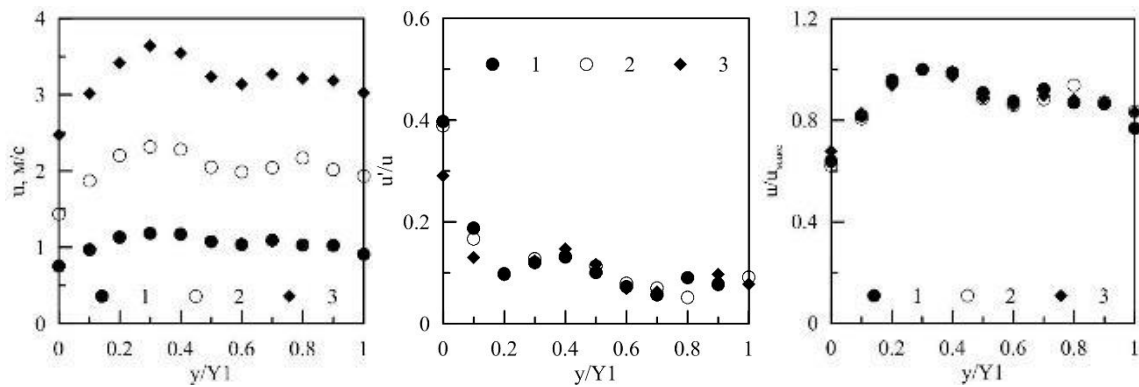
(a)  $Z = -50$  мм(б)  $Z = -15$  мм,(в)  $Z = 20$  мм(г)  $Z = 50$  мм,

Рисунок 29 – Распределение гидродинамических параметров потока:  
1 -  $Re = 8000$ ; 2 -  $Re = 16000$ ; 3 -  $Re = 24000$ .

### 3.1.8 Влияние диаметра и относительного шага твэлов на поток

Выполнены измерения параметров течения при относительном расстоянии между стержнями  $S/D=1,2; 1,3; 1,4; 1,45$  и диаметрах имитаторов твэлов  $D=9, 10, 15$  мм. Для позиционирования стержней-имитаторов твэлов использовались прототипы дистанционирующих решеток, созданные с помощью гидроабразивной резки (см. рисунок 6 б). Высота решеток – 5 мм, толщина материала решеток  $0,4\div 0,9$ . Оптическая схема проведения измерений скорости теплоносителя в 7-ми стержневой сборке приведена на рисунке 30. Проведение измерений локальных скоростей жидкости было выполнено вдоль линии  $Y_2$ , обозначенной на рисунке красным цветом. Шаг измерений скорости составлял 0,45 мм. Для реализации измерений использованы параллельные, оптически прозрачные стенки рабочего участка, расположенные с внутренней и внешней сторон корпуса экспериментальной модели. Для этих целей был изготовлен сегмент рабочего канала из оргстекла. Данная линия измерений является наиболее корректной для измерений профиля скорости именно вблизи центрального стержня, что является необходимым для кроссвалидации данных, получаемых с помощью ЛДИС и электродиффузионного метода. Кроме того, при использовании такой оптической схемы наблюдается наименьшее возмущение потока при установке прозрачного окна.

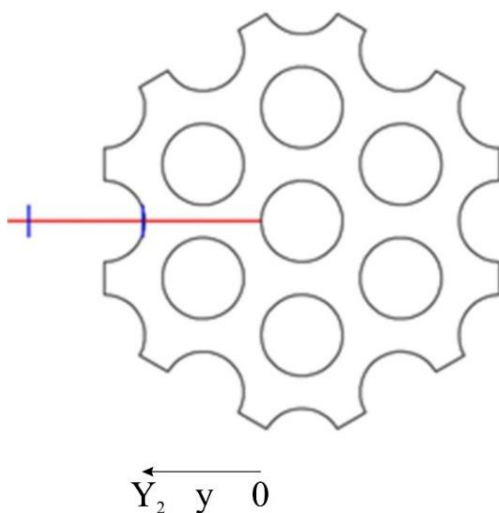


Рисунок 30 – Схема проведения измерений скорости в 7-ми стержневой сборке.

Пример измерений скорости проводимых на моделях ТВС с диаметрами стержней 9, 10 и 15 мм и относительным расстоянием между ними 1,4 показан на рисунке 31. Здесь  $y$  – расстояние от внешней стенки,  $Y_2$  – длина части линии 2 между соседними стержнями. Отсчет координат ведется от места заведения измерительного объема лазера вглубь сборки. Расстояние от дистанционирующей решётки, на котором проводились измерения – 200 мм. Эксперименты

выполнялись при числах Рейнольдса  $500 \div 10000$ . Выбор столь малых чисел Рейнольдса обусловлен направленностью исследований на верификацию CFD расчетных кодов, используемых в атомной энергетике и моделирование аварийных ситуаций с потерей расхода теплоносителя (LOCA).

На графиках приведены величины, нормированные на среднерасходную скорость жидкости  $V_{\text{ж}}$ . При увеличении числа Рейнольдса потока и смене режима течения наблюдается изменение максимума отношения  $u/V_{\text{ж}}$  с со значений около 1,6, до  $\sim 1,25$ .

Данные, полученные для разных диаметров имитаторов твэлов при одном относительном шаге подобны. То же самое можно сказать и о поведении пульсационных характеристик потока.

Измерения напряжения трения на поверхности имитатора твэла производились на расстояниях  $H=200$  и  $300$  мм от дистанционирующей решетки для исключения ее влияния на течение жидкости. Каждая точка измерялась 10 секунд, затем результат измерения усреднялся.

Угловая координата точки измерения изменялась в пределах  $0 \div 360$  градусов (полный круг). Перемещение датчиков внутри рабочих участков осуществлялось с помощью автоматизированной системы позиционирования центрального стержня, основанной на использовании программируемых контроллеров, шаговых двигателей и управляющих блоков, подключенных к последовательному порту компьютера. Начальное положение датчика по углу устанавливалось с помощью угломера с погрешностью  $\pm 1^\circ$ .

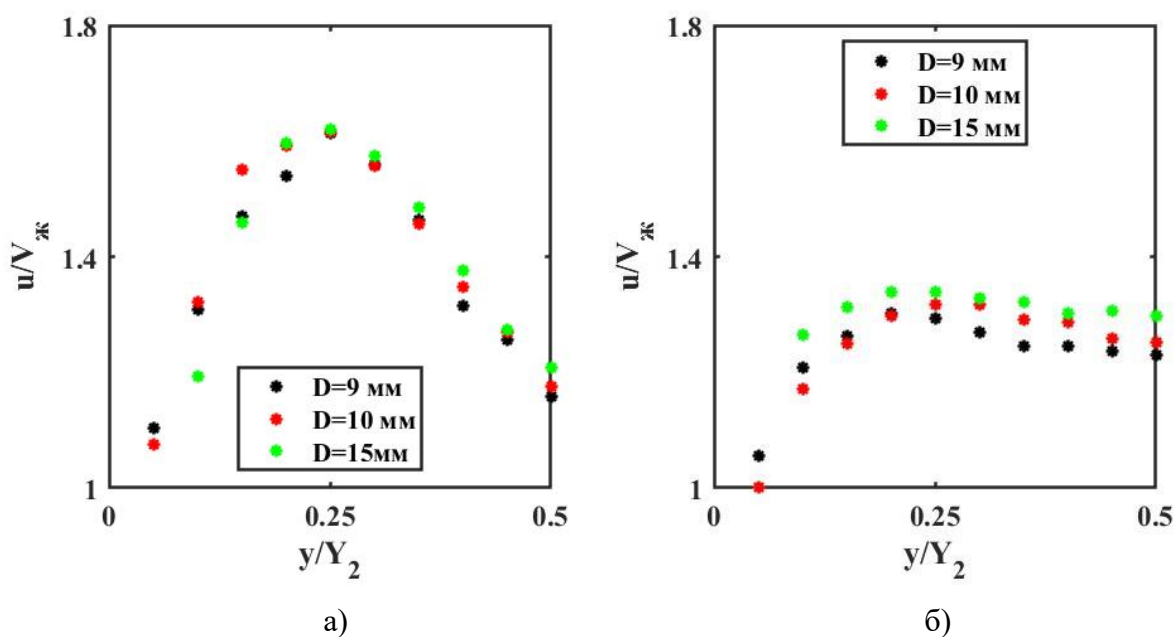


Рисунок 31 - Распределение скорости в межтвэльном пространстве:  
а –  $Re = 500$ ; б –  $Re = 10000$ .

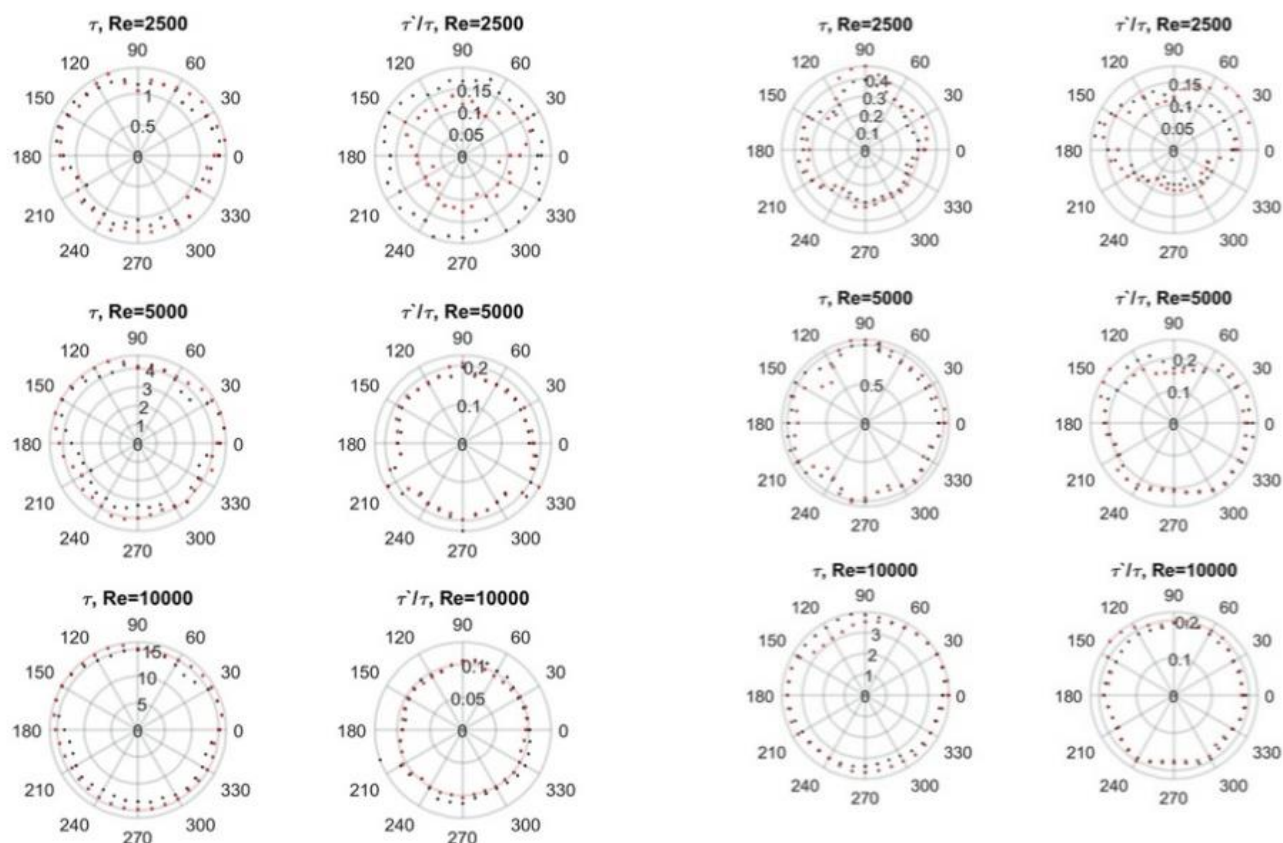


Рисунок 32 – Азимутальные распределения напряжения трения на стенке и его пульсаций,  $D = 9$  мм: слева  $S/D = 1,2$ , справа  $S/D = 1,45$ . Черные символы –  $H = 200$  мм, красные символы –  $H = 300$  мм.

Типичные профили азимутального распределения напряжения трения на стенке и его пульсаций приведены на рисунках 32 в зависимости от режима течения на примере 7-ми стержневой модели ТВС [85, 86].

Осредненные по азимутальному углу значения напряжения трения за решёткой и его относительные пульсации в зависимости от относительного шага приведены на рисунке 33. Значения среднего по периметру стержня трения усреднялись по всем точкам азимутального профиля. Как видно, в области турбулентного течения происходит рост величины напряжения трения на стенке стержня, однако при заданном числе Рейнольдса и при увеличении относительного расстояния между стержнями трение уменьшается. Пульсации трения, наоборот, увеличиваются с увеличением шага стержней, что говорит о вероятной стабилизации потока в стесненных условиях. Такое же поведение неравномерности в распределении по периметру стержня и пульсаций трения, что свидетельствует об устойчивости течения. Для переходной области течения проявляются пульсационные явления, что находит отражение в неравномерных по периметру стержня распределениях пульсаций трения.

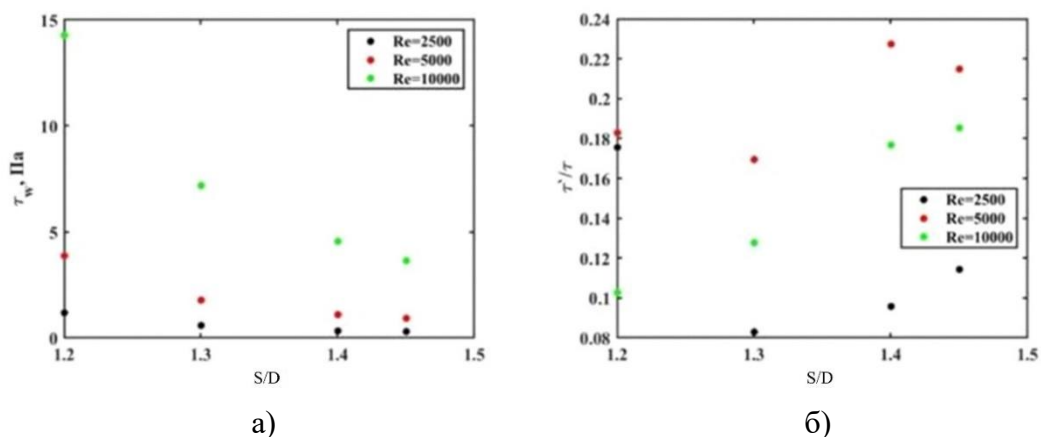


Рисунок 33 – Осредненные по азимутальному углу значения напряжения трения (а) и значения пульсаций напряжения трения (б) в зависимости от числа Рейнольдса и шага стержней.  $D = 9$  мм,  $H = 200$  мм.

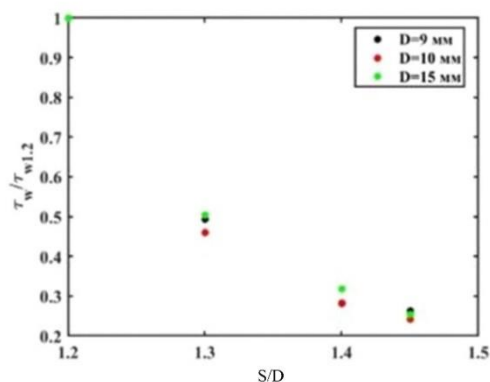


Рисунок 34 – Осредненные по азимутальному углу значения напряжения трения на стенке при вариации диаметров стержней и относительного расстояния между ними.

Относительные гидродинамические характеристики течения довольно хорошо масштабируются с увеличением диаметра стержней. Найдено хорошее качественное подобие течения в каналах 7-ми и 37-ми стержневых сборок. Результаты измерений показали также, что тенденция изменения напряжения трения на стенке при смене относительного шага практически не зависит от диаметра стержня – рисунок 34.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что при обтекании потоком жидкости ДР, возникают существенно неравномерные распределения скорости теплоносителя (см. рисунок 35), а также напряжения трения на поверхности стержня – имитатора твэла (см. рисунок 36) в зависимости от азимутального угла вокруг стержня. Из-за смыкания сот ДР, вокруг твэлов создается три «открытых» и три «закрытых» ячейки (см. рисунок 5 б). Это существенно сказывается на гидродинамической структуре течения (наиболее выражено на малых расстояниях ниже по потоку от ДР - Z). В центральной области «открытой» ячейки относительная скорость течения жидкости  $u/V_{ж}$ , где  $u$  – вертикальная компонента



скорости,  $V_{ж}$  – приведенная скорость жидкости, выше, чем для «закрытой» (см. рисунок 35). Влияние ДР также хорошо видно по распределению относительного напряжения трения на стенке имитатора твэла  $\tau_w/\tau_0$ , где  $\tau_w$  – напряжение трения на стенке в данной точке,  $\tau_0$  – напряжение трения на стенке в невозмущенном потоке (см. рисунок 36).

Распределение осредненного по азимутальному углу напряжения трения на стенке имитатора твэла ниже ДР по потоку приведено на рисунке 37. Данные получены в 7-ми стержневой модели ТВС при  $Re = 10000$ . Для  $S/D = 1,2$  напряжения трения непосредственно за решеткой выше, чем для большего относительного шага. Увеличение напряжения трения на стенке в сравнении с невозмущенным потоком достигает  $50 \div 60\%$  для  $S/D = 1,2$  и  $20 \div 30\%$  для  $S/D = 1,4$ . Это объясняется тем, что при одинаковой толщине материала решетки, площадь затенения выше при малом относительном шаге.

В рамках диссертационного исследования впервые проведены измерения скорости жидкости в межтвэльном пространстве в 7-ми и 37-ми ячеистых моделях ТВС РУ АЭС-2006 за дистанционирующей решеткой с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС). На рисунке 38 приведены распределения осевой скорости течения по поперечной координате между двумя соседними стержнями – имитаторами твэла. Эти данные подтверждают описанные выше особенности течения за ДР с учетом наличия «открытых» и «закрытых» ячеек.

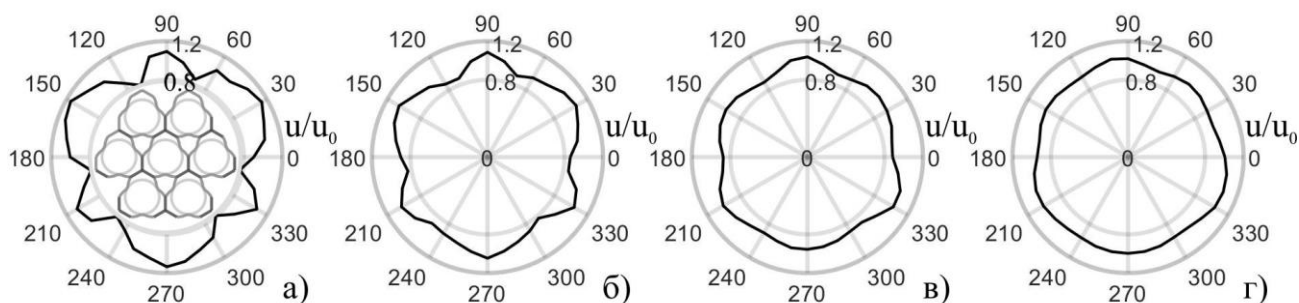


Рисунок 35 – Распределения относительной скорости теплоносителя вокруг центрального имитатора твэла: а –  $Z/D = 1$ ; б –  $Z/D = 3$ ; в –  $Z/D = 5$ ; г –  $Z/D = 9$ .

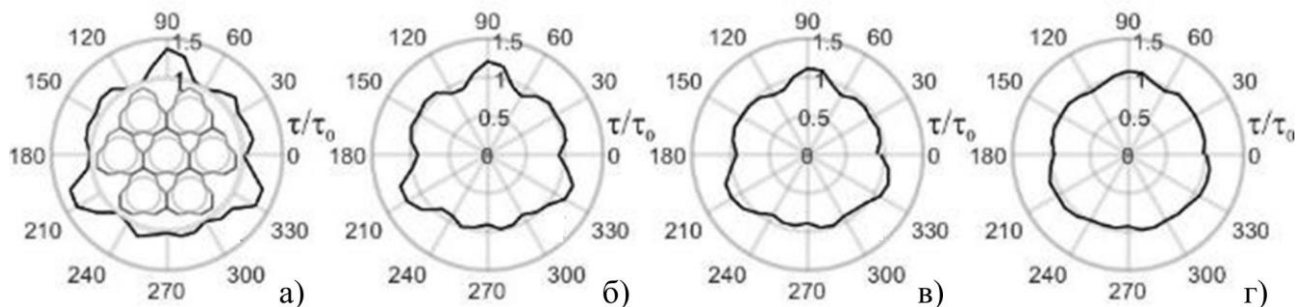


Рисунок 36 – Распределение относительного напряжения трения на стенке центрального имитатора твэла  $\tau_w/\tau_0$ : а –  $Z/D = 1$ ; б –  $Z/D = 3$ ; в –  $Z/D = 5$ ; г –  $Z/D = 9$ .

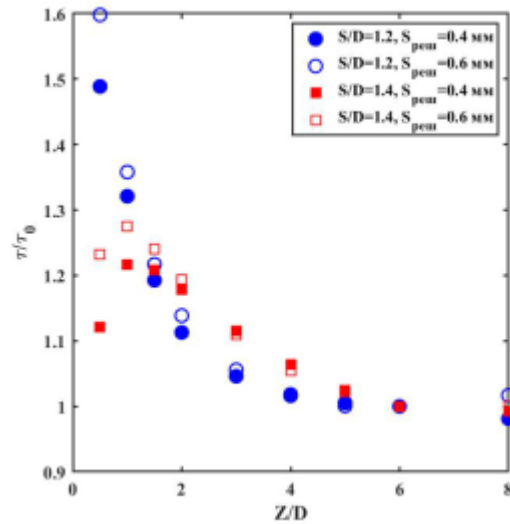


Рисунок 37 – Распределение касательных напряжений на разных расстояниях от ДР.

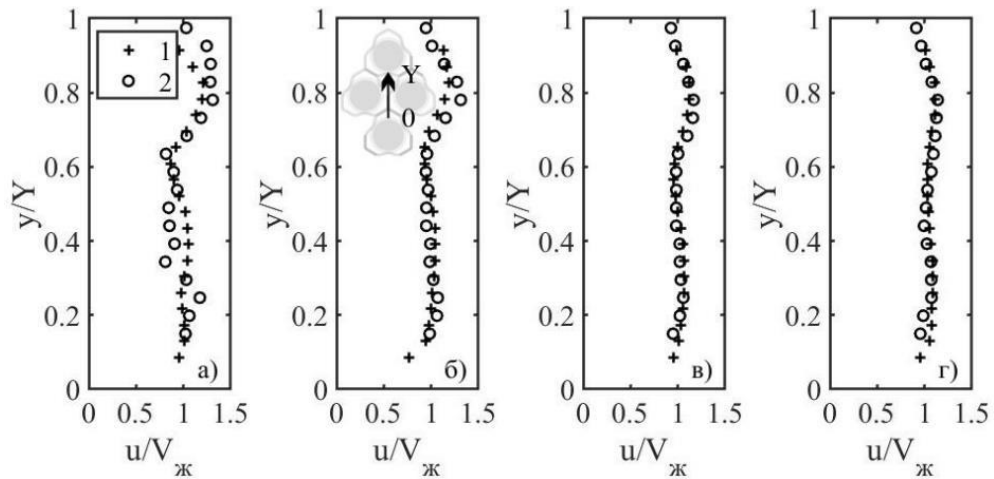


Рисунок 38 – Распределения относительной скорости в межтвэльном пространстве, полученные с помощью ЛДИС (1) и трубки Пито (2): а –  $Z/D = 1$ ; б –  $Z/D = 3$ ; в –  $Z/D = 5$ ; в –  $Z/D = 9$ .

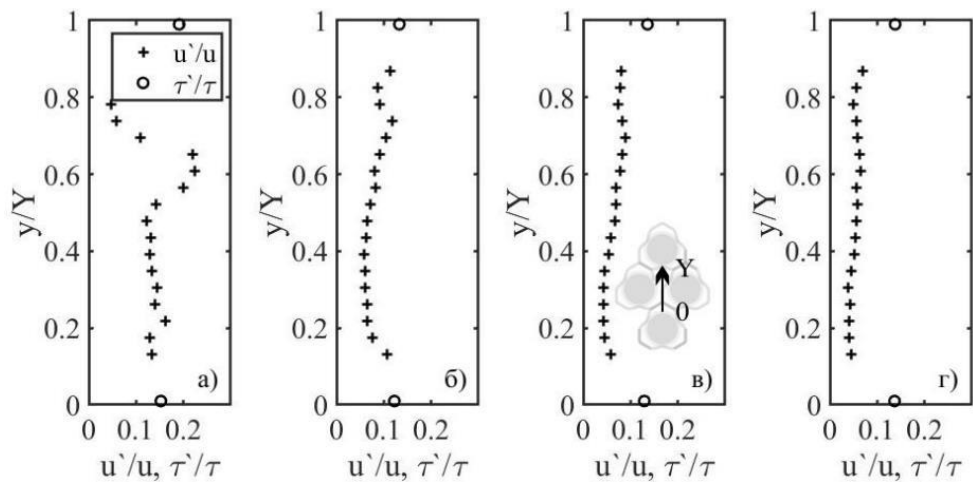


Рисунок 39 – Распределение относительных пульсаций скорости в межтвэльном пространстве  $u'/u$  и напряжения трения на стенке  $\tau'/\tau$ : а –  $Z/D = 1$ ; б –  $Z/D = 3$ ; в –  $Z/D = 5$ ; в –  $Z/D = 9$ .

Полученные в 7-ми ячейстой модели ТВС распределения относительных пульсаций скорости в межтвэльном пространстве  $u'/u$  и напряжения трения на стенке  $\tau'/\tau$  приведены на рисунке 39. Установлено, что наличие ДР в потоке приводит интенсификации степени турбулентности течения. Относительные пульсации скорости в ячейках  $u'/u$  и напряжения трения на стенке имитаторов твэлов  $\tau'/\tau$  достигают значений порядка  $0,15 \div 0,2$ . При удалении от ДР происходит восстановление локальной гидродинамической структуры потока. В этой области  $u'/u$  в центрах ячеек достигает значений  $0,05 \div 0,06$ , а  $\tau'/\tau$  - около 0,15.

Установлено, что азимутальная неравномерность распределения напряжения трения для всех тестируемых моделей ТВС составляет единицы процентов и имеет тенденцию к снижению с увеличением относительного шага между стержнями и увеличением диаметра стержней. При этом нет существенной разницы для 7-ми и 37-ми стержневых моделей, что подтверждает подобие процессов при изменении масштабирования.

### 3.2 Исследование двухфазного течения в тепловыделяющей сборке

Разработана методика и средства измерения газосодержания в двухфазном течении в межтвэльном пространстве 37 стержневой модели ТВС. Генератор пузырей устанавливался в круглую трубу, находящуюся непосредственно перед входом жидкости в сборку стержней. Модельная ТВС конфигурировалась следующим образом (см. рисунок 40): на расстояниях 50, 300 и 1150 мм от входа в рабочий участок устанавливались дистанционирующие решетки типа МТВС, на расстоянии 610 мм от входа в рабочий участок устанавливалась тестируемая дистанционирующая решетка ДР2. Генератор пузырей был расположен на расстоянии 50 мм от нижних торцов имитаторов твэлов.

При измерении газосодержания в межтвэльном промежутке в качестве рабочей жидкости использовался раствор хлорида натрия в дистиллированной воде в концентрации 1 г/л. Локальное газосодержание измерялось миниатюрным датчиком типа «лобовая точка», показанном на рисунке 41 а. Он представлял собой платиновую проволоку диаметром 50 мкм, вваренную в стеклянный капилляр конической формы, диаметр рабочей части датчика составлял 0,06 мм. Капилляр затем клеивался эпоксидной смолой в державку, изготовленную из латунной трубки диаметром 2 мм. Державка закреплялась на центральном стержне сборки таким образом, чтобы чувствительный элемент находился посередине между центральным и одним из шести окружающих его имитаторов твэла. Поворачивая центральный стержень сборки вокруг оси,

появлялась возможность определять распределение среднего по азимутальному углу газосодержания.

При работе в газожидкостном потоке ток датчика зависит от смены на чувствительном элементе жидкой и газовой фаз. Моменты переходов между фазами в сигнале датчика проводимости являются достаточно резкими. Для проведения измерений на датчик подавалось высокочастотное напряжение частотой 100 кГц. Далее полученный сигнал датчика усиливался и сглаживался. Показание датчика имеет два фиксированных значения, соответствующих нахождению датчика в жидкой и газовой фазах (см. рисунок 41 б).

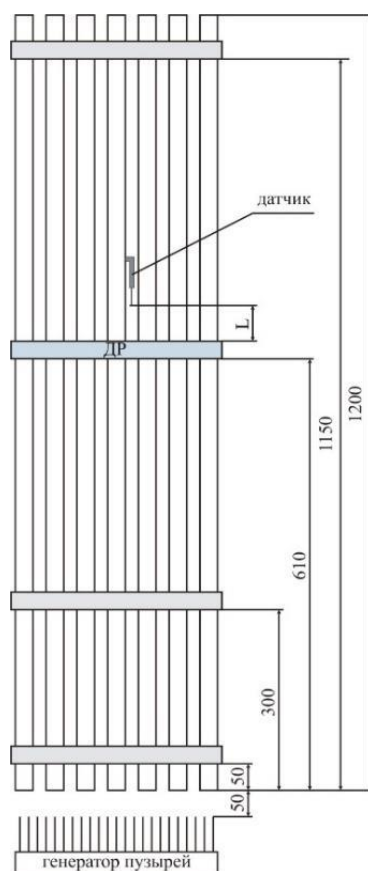


Рисунок 40 – Схема размещения основных элементов при исследовании газожидкостных потоков в 37-ячеечной сборке имитаторов твэлов.

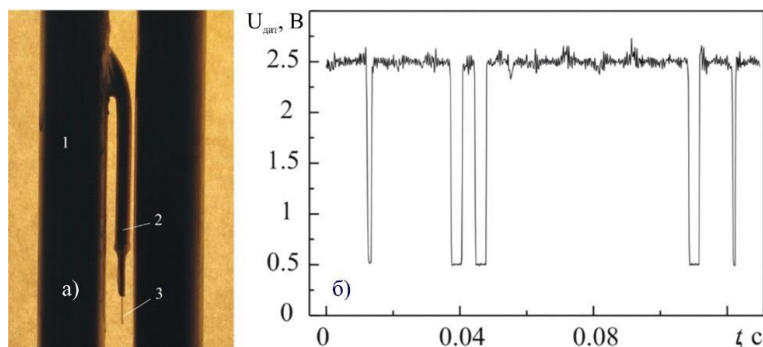


Рисунок 41 – Фотография датчика локального газосодержания (а) и сигнал датчика в двухфазном пузырьковом течении (б).

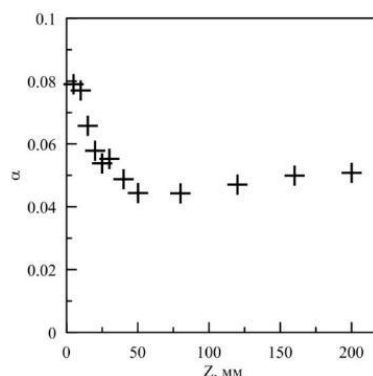


Рисунок 42 – Зависимость осредненного по сечению локального газосодержания от расстояния от решетки.

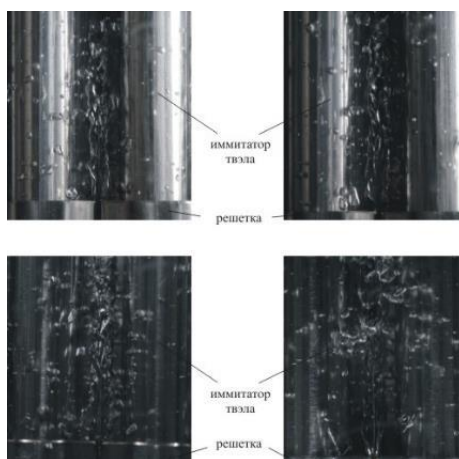


Рисунок 43 – Фотографии газожидкостного потока в сборке ТВЭЛов за ДР.

График распределения осредненного по сечению газосодержания ( $\alpha$ ) в зависимости от расстояния до решетки приведен на рисунке 42. Заметно, что на малых расстояниях от решетки наблюдаются повышенные значения  $\alpha$ , которые резко падают при удалении от решетки. С увеличением расстояния от решетки газ распределен более равномерно и значения усредненного газосодержания в этой области приблизительно в два раза ниже, чем вблизи решетки. Визуальные наблюдения показывают, что данный эффект можно объяснить формированием за решеткой пузырьковых «факелов», фотографии которых приведены на рисунке 43. Увеличение локального газосодержания было найдено за всеми типами ДР, ПР и ДПР (всего более 19 конструкций). Данный эффект требует глубокого изучения в реакторных условиях, т.к. может напрямую влиять на безопасность функционирования РУ.

### 3.2.1 Исследования в потоке с впрыском газа из одиночного сопла

Для уточнения закономерностей поведения газовой фазы в условиях ТВС было проведено исследование межканальной миграции газовой фазы. Для этого в поток вводили газ через

единичный капилляр на расстоянии 100 мм выше нижней решетки сборки через один из прилегающих к центральному имитаторов твэла (см. рисунок 44). Воздух через штуцер 1 подавался в полость имитатора твэла 2, расположенного вблизи центрального имитатора твэла сборки. Далее воздух проходил через изогнутую медную трубку 3, свободный конец которой находился в потоке жидкости в межтвэльном пространстве. Формирование двухфазного газожидкостного потока происходило за счет отрыва пузырей 4 от торцевого конца трубки. Внутренний диаметр трубки равнялся 1,2 мм, внешний 1,5 мм. Трубка вклеена в стенку имитатора твэла таким образом, чтобы их стенки соприкасались. Место заклейки обозначено на рисунке цифрой 5. Для предотвращения утечки газа через нижний конец имитатора твэла использовалась заглушка 6. Контроль расхода воздуха производился по перепаду давления на расходомерной диафрагме, который измерялся дифференциальным преобразователем давления Метран 100 ДД.

Для получения более точной картины процесса производилось перемещение точки ввода газа согласно рисунку 45 (центральная часть). Измерения производились при 12 положениях точки ввода газа, разнесенных друг относительно друга на угол  $\theta = 30^\circ$ . Положения позиций ввода газа показаны на рисунке малыми кругами. Расположение точки ввода газа выбиралось таким образом, чтобы в начальной позиции газ вводился в центр канала. Газ вводился как в смежные с центральным имитатором твэла каналы, так и в периферийные. Линия проведения измерений обозначена на рисунке пунктиром.

Измеренные зависимости распределения локального газосодержания вокруг центрального имитатора твэла для разных положений приведены на фигурах, расположенных в периферийной части рисунка 45. Эти распределения позволяют определить основные закономерности распределения легкой фазы в ТВС [355]. При вводе газа в область, прилегающую к центральному имитатору твэла, газ распределен неоднородно, заметно три пика газосодержания, расположенных в части графиков, которая соответствует положению точки ввода газа. Азимутальный угол между областями с повышенным газосодержанием составляет 60 градусов. Это говорит о том, что газ предпочитает передвигаться в ячейках. Максимальное газосодержание обнаружено в ячейке, в которую происходит подача газа, в соседних ячейках оно ниже.

Важно отметить различие между картинками распределения газосодержания, полученными при  $\gamma = 0$  и 60 градусов. Для  $\gamma = 0$  измеренное газосодержание по всему полю ниже, хотя в обоих случаях газ вводится в середину соответствующей ячейки. Это вызвано взаимодействием газовой фазы с ДР и особенностями ее геометрии. Ранее было показано, что

места стыка между сотами оказывают влияние на распределение локальных гидродинамических параметров. Так, локальная скорость жидкости за решеткой выше в «открытых» каналах, чем в «закрытых». Похожее влияние решетка оказывает на распределение газовой фазы, в «открытом» канале  $\alpha$  выше, чем в «закрытом».

Вблизи противоположной стороны имитатора твэла наблюдаются низкие и практически нулевые значения локального газосодержания. Регистрации газовых пузырей в этой области практически не происходит. Такая картина наблюдается на всем протяжении сборки.

Полученные данные свидетельствуют, что в ячейке, в которую вводится газ, формируется пузырьковая колонна. Локальное газосодержание достигает порядка 0,3. При этом величина  $\alpha \sim 0,3$  являлась пороговой для разных положений и расходов газа. При достижении этой величины наблюдалось перераспределение газа в соседние каналы. Известно, что подобная величина  $\alpha$  является пороговой для перехода от пузырькового к снарядному режиму течения. При этом переход газа между каналами может осуществляться не только за счет перехода пузырей, но и распространением крупных пузырей между соседними ячейками (т.н. ячейковые пузыри Тейлора).

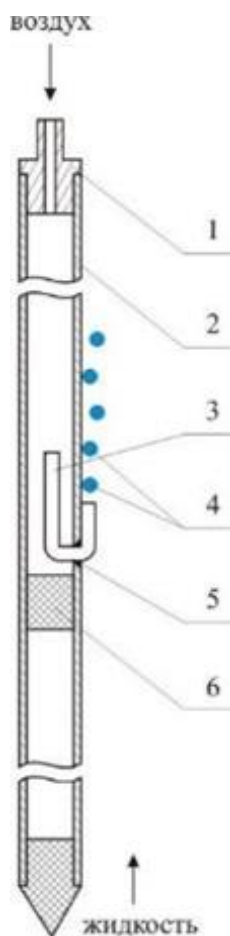


Рисунок 44 – Схема ввода газа в поток через единственный капилляр.



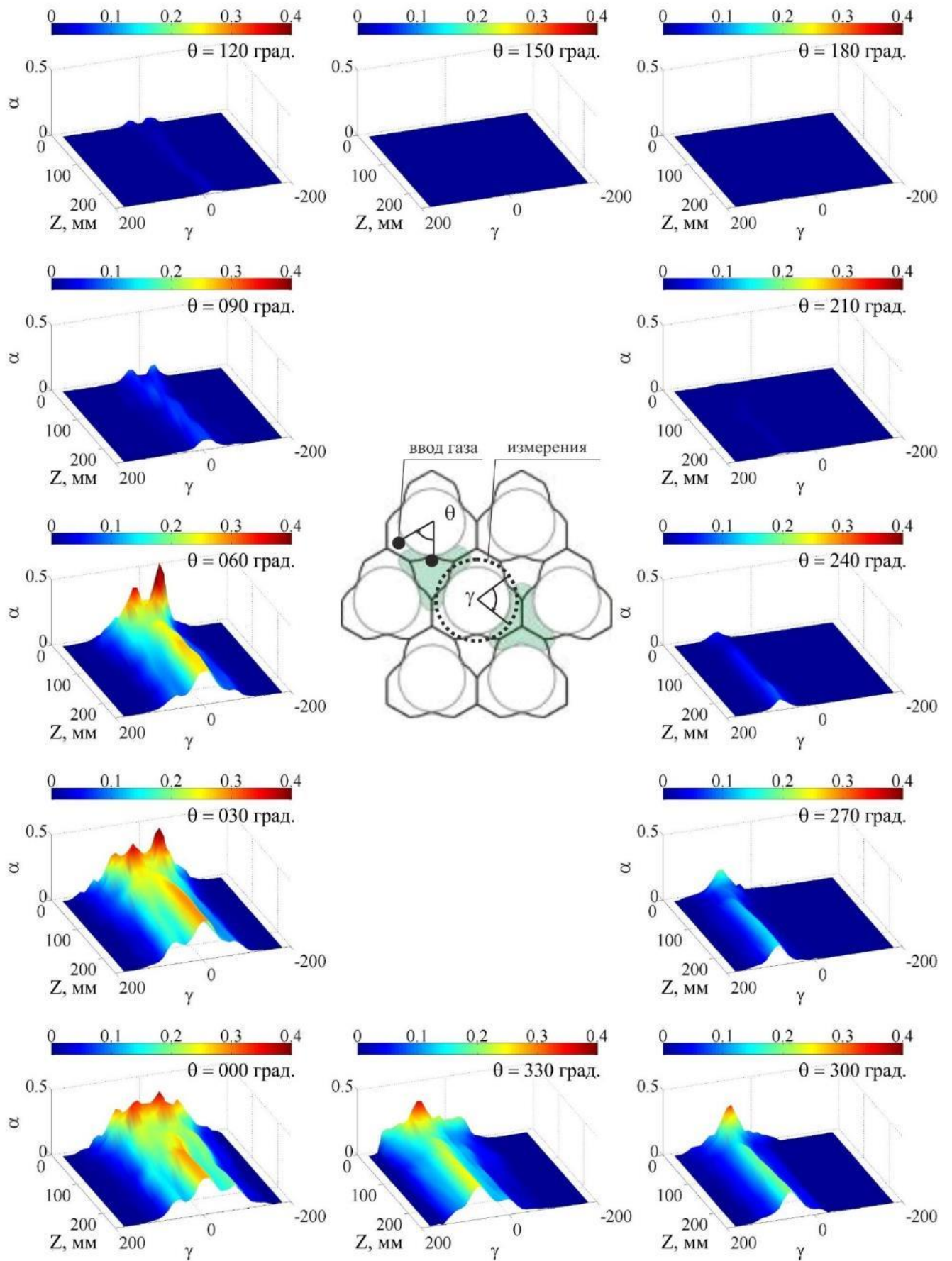


Рисунок 45 – Распределение локального газосодержания при вводе газа из одиночного источника.



Фотографии газожидкостного потока в межтвэльном пространстве приведены на рисунке 46. Визуальные наблюдения показывают, что в потоке возможно движение как мелких пузырей газа, так и крупных газовых образований, перекрывающих поперечное сечение ячейки. Возникает вопрос о взаимодействии крупных пузырей, занимающих сечение ячейки с дистанционирующей решеткой.

Для исследования данного эффекта производился эксперимент. Газ вводился в поток на расстоянии 200 мм от дистанционирующей решетки выше по потоку. Измерения  $\alpha$  производились на расстояниях: 60 мм до решетки, 20, 100 и 240 мм за решеткой. Результаты приведены на рисунке 47. Данные о длине вертикальной хорды газовых пузырей можно определить по времени взаимодействия газовой фазы с датчиком по формуле:

$$t = L_{\text{п}}/V_{\text{ж}} \quad (24),$$

где  $L_{\text{п}}$ -длина хорды пузыря. При  $Re = 40000$  время взаимодействия с датчиком пузыря диаметром 6 мм, размер которого соизмерим с поперечным сечением канала, составит менее 2 мс. Большее время взаимодействия говорит о наличии в потоке крупной газовой полости. На гистограммах распределения размеров пузырей (см. рисунок 47 а) можно отметить наличие достаточно большого количества таких пузырей перед ДР. После прохождения двухфазным потоком ДР доля мелких пузырей в потоке значительно увеличивается, а крупных – снижается. Это говорит о дроблении крупных пузырей при их взаимодействии с ДР. При этом форма гистограммы слабо изменяется с увеличением расстояния до ДР. Таким образом подтверждается малая степень слияния пузырей за ДР. То же показывают данные о количестве пузырей за ДР (см. рисунок 47 б).

С помощью скоростной теневой видеосъемки проведено исследование характеристик течения двухфазного потока в межтвэльном пространстве. Схема проведения измерений показана на рисунке 48. Газ подавался в один из каналов, отмеченный на рисунке синим кругом. С одной стороны сборки был установлен источник света, а с другой - скоростная камера с частотой съемки до 2000 кадров в секунду. С помощью обработки полученных изображений на компьютере получены данные о скорости движения газовых фрагментов и режима течения двухфазного потока (см. рис 49 а.).

Обнаружен линейный рост скорости пузырей с увеличением скорости жидкости. Для сравнения приведены данные модели [270] для скорости движения пузырей в гексагональной сборке:

$$U_{\text{п}} = C_0 V_{\text{гж}} + V_{\infty} \quad (25),$$

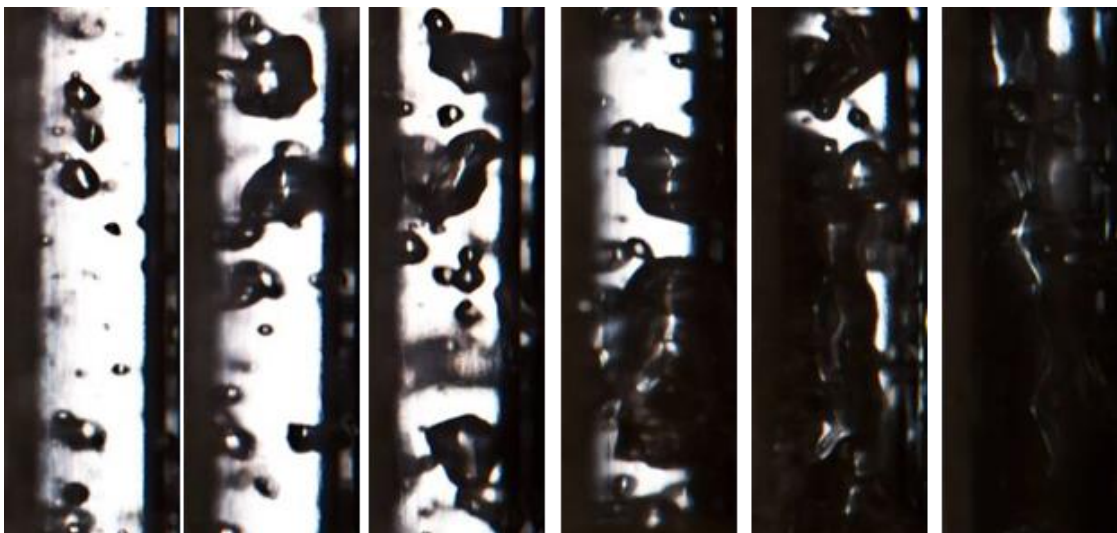


Рисунок 46 – Фотографии пузырей в межтвэльном пространстве.

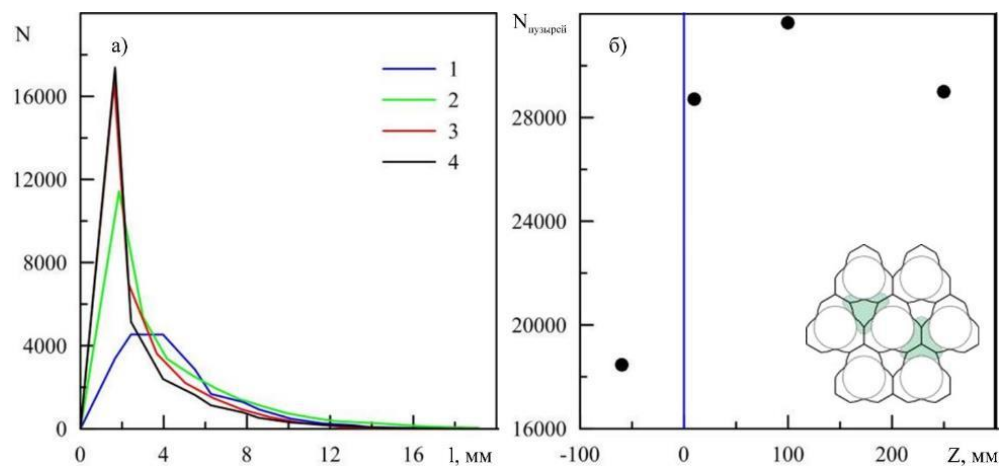


Рисунок 47 – Оценка результатов взаимодействия пузырей с ДР.

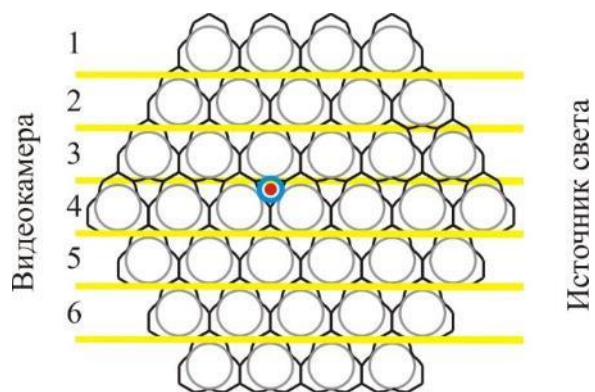


Рисунок 48 – Схема проведения измерений с помощью оптического метода.

Где  $V_{\infty}$  – скорость всплытия пузырей в неподвижной жидкости в сборке. По данным [272]  $V_{\infty}=0,24$  м/с. Расчеты находятся в пределах неопределенности экспериментальных результатов. Это подтверждает корректность использования предложенной в [270, 272] модели для РУ ВВЭР.

Проведен анализ режимов течения двухфазного потока в ячейке (см. рис 49 б). В качестве характеристики газовой фазы выбрано локальное газосодержание в центре ячейки. Классификация режимов течения проведена в соответствии с [270]. Обнаружены пузырьковый, ячейковый снарядный, снарядный и переходные режимы течения. Как и было предположено ранее, переход к снарядному режиму происходит при  $\alpha \sim 0,3$ . В этом режиме пузырь занимает несколько находящихся рядом ячеек и снижение газосодержания в канале вызвано переходом газа, находящегося в объеме крупных пузырей между каналами.

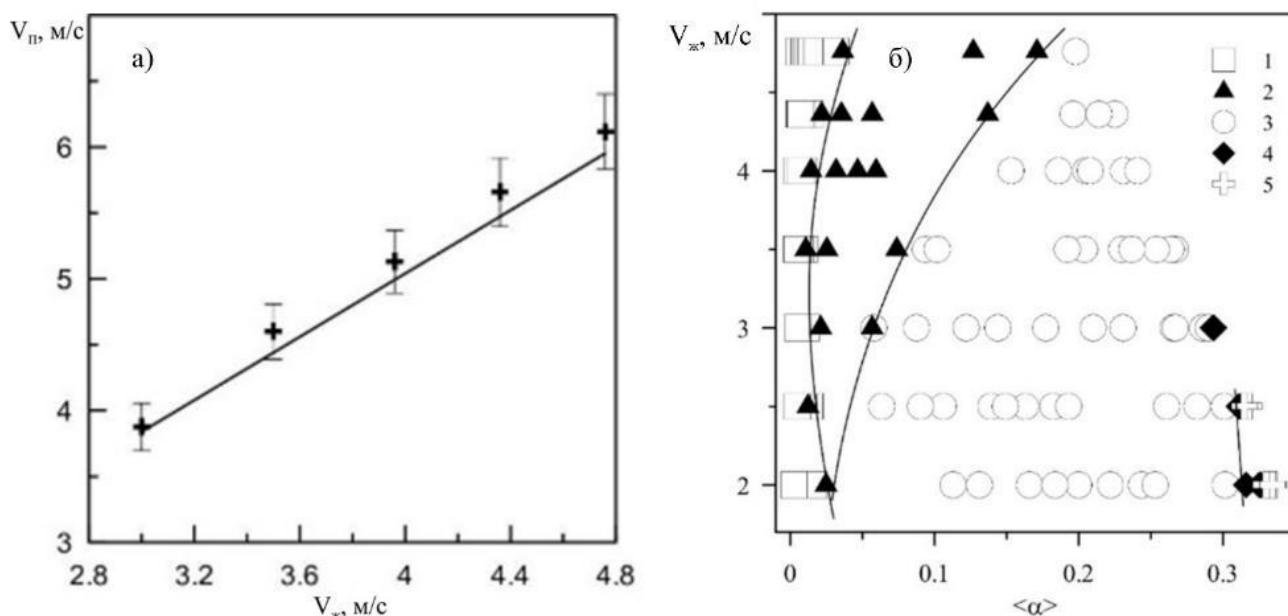


Рисунок 49 – Скорость движения газовых пузырей в потоке (а) и карта режимов течения при вводе в ячейку пузырей газа (б): 1 – пузырьковый; 2 – переходный; 3 – каналный снарядный; 4 – переходный; 5 – снарядный(несколько ячеек).

Проведено исследование теплообмена двухфазного потока. Эксперименты проведены при  $Re=40000$ . Полученные в двухфазном потоке результаты были отнесены к характерным для однофазного потока на том же расстоянии от ДР (см. рисунок 50 а). Можно наблюдать интенсификацию теплообмена в ячейке, в которой движется газ. Механизмы интенсификации теплообмена в двухфазном потоке описаны в приведенных выше главах. Данные о распределении локального газосодержания для этого эксперимента приведены на рисунке 50 б. Можно отметить, что при значениях канального  $\alpha$  около 0,3 наблюдается интенсификация теплообмена на величину порядка  $6 \div 8\%$ .

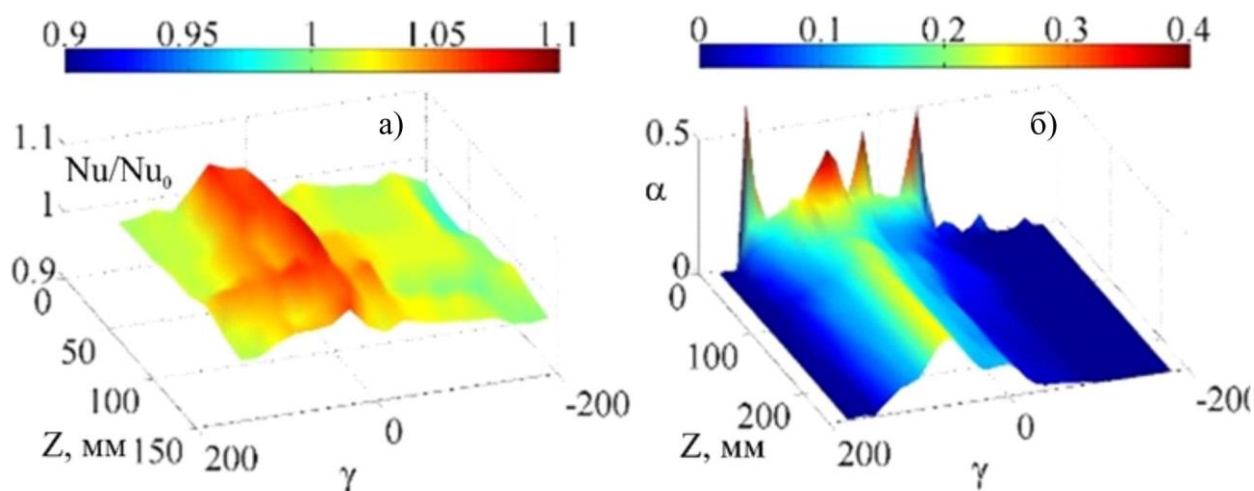


Рисунок 50 – Теплообмен (а) и распределение локального газосодержания (б) при вводе газа в модель ТВС из одиночного источника.

### 3.2.2 Параметры потока при распределенном вводе газа

Проведены исследования течения двухфазного потока при распределенном вводе газа. Схема экспериментов показана на рисунке 51. Газ вводился в поток через шесть изогнутых медных трубок (внутренний диаметр 1,2 мм, внешний 1,5 мм). Были использованы две группы трубок. Первая из них была смонтирована в шести ближайших ячейках вокруг центрального стержня. Эти трубки показаны на рисунке красными точками. Шесть трубок были установлены в периферийных относительно центрального стержня ячейках. Эти трубки показаны на рисунке в виде синих точек (см. рисунок 52). Схема экспериментальной модели приведена на рисунке 52. Модель состояла из 37 стержней 1. Общая длина пучка составляла 1,2 м. На входе в канал был установлен хонейкомб 2 для обеспечения равномерного потока. Пять ДР 3 были размещены на расстоянии 50, 250, 730, 950 и 1150 мм от нижнего конца пучка стержней. Высота решеток составляла 30 мм (ДР2).

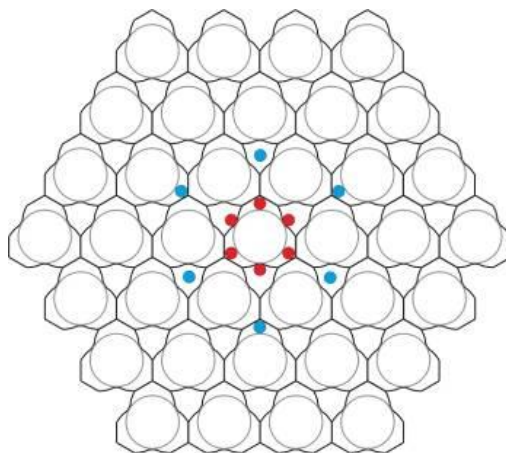


Рисунок 51 – Схема распределенного ввода газа в поток.

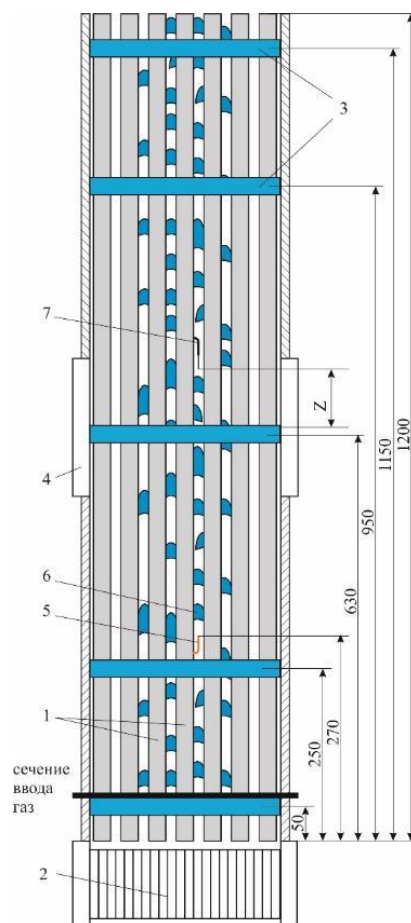


Рисунок 52 – Конфигурация рабочего участка.

На рисунке 53 а показаны значения  $\alpha$  для «центральной» подачи газа и  $Q_{\Gamma} = 140, 230, 260$  мл / с. Наблюдается распределение локального газосодержания с 6 «лепестками». Их позиции совпадают с расположением ячеек. Как и в случае с одиночным вводом газа, пики газосодержания не равны, и в «открытых» ячейках  $\alpha$  выше, чем в «закрытых», максимальное значение  $\alpha$  около 0,3.

При подаче газа в «периферийную» относительно центрального стержня область канала, значения  $\alpha$  не превышают 0,12, что говорит о слабой миграции газа между ячейками, что и было отмечено выше (см. рисунок 53 б).

На рисунке 54 а показаны усредненные по окружности значения  $\alpha$  при  $Q_{\Gamma} = 140, 230, 260$  мл / с. Как и в предыдущих экспериментах, наблюдается увеличение  $\alpha$  сразу после ДР. На расстояниях от ДР более 100 мм локальное газосодержание выходит на постоянную величину. Аналогичные данные для периферийного ввода газа представлены на рисунке 54 б. Локальное газосодержание этом случае значительно ниже. Данные, полученные для центральной подачи газа и  $Q_{\Gamma} = 140$  мл / с, и периферийной подачи для  $Q_{\Gamma} = 260$  мл / с практически совпадают.

Зависимость осредненного коэффициента теплообмена от расстояния от ДР показана на рисунке 54 в. Данные для центрального ввода газа показаны красными символами, а для периферийного - голубыми. Для сравнения приведены данные для однофазного потока ( $h_0$ ). Обнаружена интенсификация теплообмена сразу за ДР. В этой области влияние пузырей на теплообмен практически отсутствует. При увеличении расстояния от ДР интенсивность теплообмена снижается. Наблюдается влияние пузырей газа на теплообмен. Наибольшее значение  $h$  измерено для центрального ввода газа и  $Q_r = 260$  мл / с. В этом режиме было обнаружено увеличение  $h$  на 5% по сравнению с однофазным потоком. Зависимости при центральном вводе газа для  $Q_r = 140$  мл / с и периферийной подаче газа для  $Q_r = 260$  мл / с практически одинаковы. Это объясняется одинаковым распределением  $\alpha$  для этих режимов. Наименьшее значение коэффициента теплообмена в двухфазном потоке было при периферийной подаче газа и  $Q_r = 140$  мл / с.

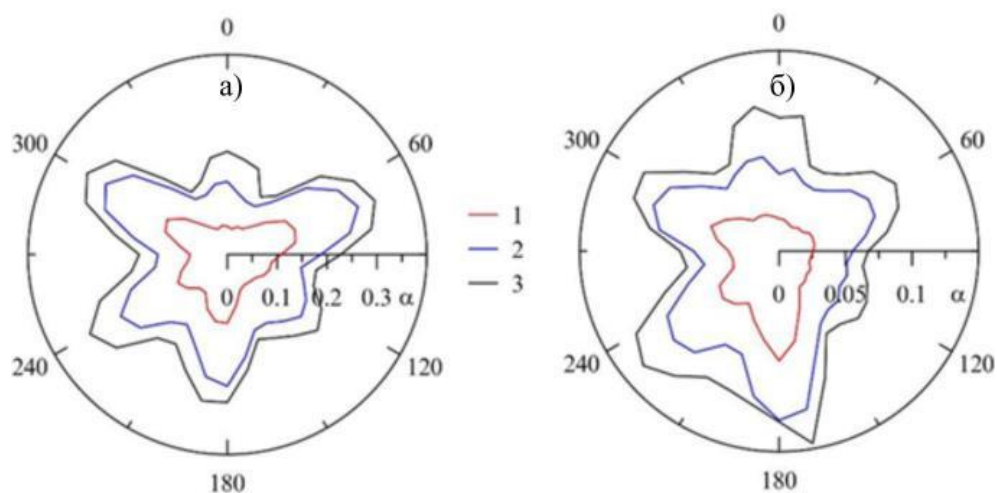


Рисунок 53 – Распределение газа при «центральной» (а) и «периферийном» (б) способах ввода газа в поток.

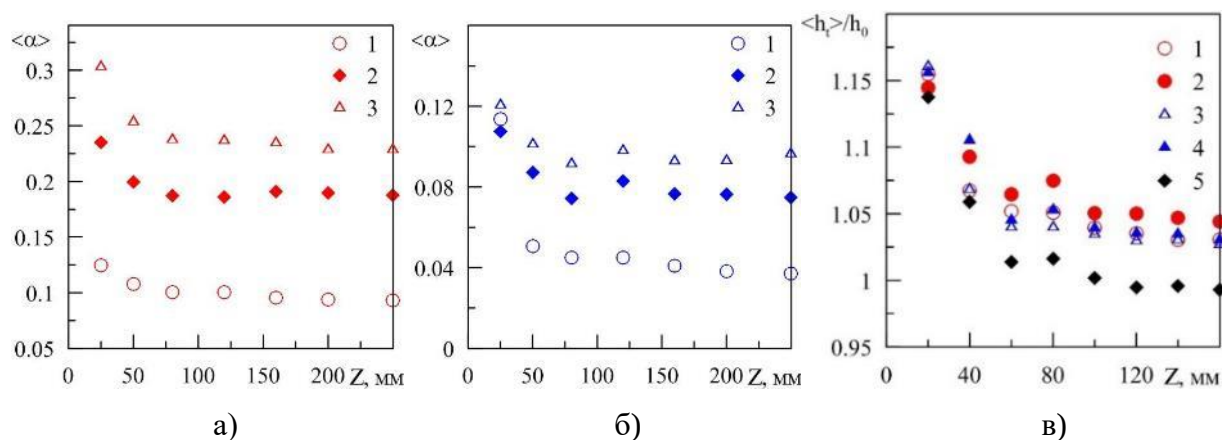


Рисунок 54 – Распределение осредненных по окружности локального газосодержания при ближнем (а) и периферийном (б) способах ввода газа и коэффициента теплообмена за дистанционирующей решеткой (в).

### 3.3 Выводы

В результате выполнения экспериментальных исследований локальных и интегральных гидродинамических параметров и теплообмена в гексагональных вертикальных сборках стержней – имитаторах тепловыделяющих сборок, при вариации диаметров и шага расположения стержней и конструкции дистанционирующих решеток, получены следующие данные:

- определены особенности распределения осредненного и пульсационного напряжения трения на стенке имитатора твэла и скорости в межканальных промежутках в ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения;

- наличие в потоке дистанционирующей решетки приводит к увеличению гидравлического сопротивления, перестройке локальной гидродинамической структуры, возникновению асимметрии потока, интенсификации коэффициентов трения (до 60%) и теплообмена (до 25%), однако распространение значимых значений приведенных параметров ниже по потоку располагается в области, длина которой не превышает  $5\div 8$  диаметров имитатора твэла;

- за дистанционирующей решеткой происходит турбулизация потока, относительные пульсации напряжения трения на стенке достигают величины 0,2, относительные пульсации скорости жидкости в межтвэльном промежутке более 0,2, а в невозмущенном потоке указанные величины находятся в диапазонах  $0,12\div 0,15$  и  $0,05\div 0,08$  соответственно;

- в двухфазном потоке теплоносителя впервые изучены закономерности пространственного распределения и скорости движения дисперсных включений в модели ТВС АЭС 2006, показано дробление пузырей при их взаимодействии с дистанционирующими решетками, формирование пузырьковых «факелов»;

- за дистанционирующей решеткой наблюдается слабое влияние пузырей на теплообмен между нагреваемым имитатором твэла и потоком, что вызвано формированием вихревых структур, однако ниже по потоку может наблюдаться значимое увеличение теплообмена за счет перемешивания течения пузырями и перестроения локальной гидродинамической структуры.

Получена база детальных экспериментальных данных, которая может быть использована для настройки различных расчетных методов.



#### 4 Гидродинамика и теплообмен двухфазных потоков в элементах реакторных установок

Наряду с водо-водяными реакторами двухфазные течения могут возникать и в РУ с ТЖМТ. Одним из важных для исследования процессов является вероятное межконтурное взаимодействие потока ТЖМТ и водяного теплоносителя второго контура. Так, при разрыве трубки ПГ парожидкостная смесь под высоким давлением попадет в нисходящий поток свинцового теплоносителя. Эксперименты по моделированию разрыва трубки с газом, находящимся под высоким давлением ( $P_0 > 10$  МПа) в нисходящем потоке прозрачной жидкости в пучке стержней между трубными решетками, указывают на возможность появления следующих характерных явлений (см. рисунок 55):

- формирование пузырькового потока в ТЖМТ;
- возникновение блокад течения ТЖМТ области разрыва, течение с частичным затенением потока;
- появление вблизи места разрыва крупного присоединенного пузыря, ухудшение гидравлики контура и теплообмена;
- осцилляции формы пузыря и давления;
- отрыв пузырькового потока за трубной доской;
- нисходящее пузырьковое течение.

Эти явления были рассмотрены в работе более подробно на основе моделирования течений газожидкостным потоком.

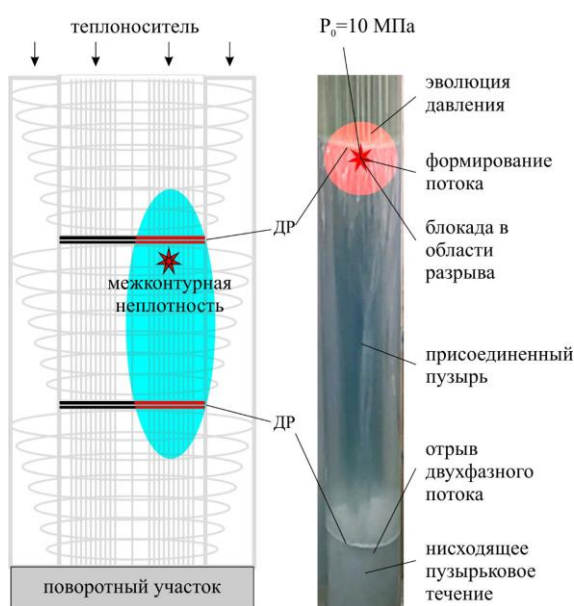


Рисунок 55 – Процессы, которые могут происходить при аварии типа «межконтурная неплотность» в ПГ РУ с ТЖМТ.



## 4.1 Структура нисходящих пузырьковых течений

### 4.1.1 Описание экспериментального стенда

Рабочий участок установки (рисунок 56) представлял собой вертикальную цилиндрическую трубу с внутренним диаметром  $D=20$  мм и был тщательно выставлен по вертикали. Он был собран из входного коллектора, генератора пузырей, участков для измерения напряжения трения на стенке, визуализации потока, изучения теплообменных характеристик и выходного коллектора. Для установления потока использовалась составная труба длиной 80 калибров (1600 мм), что обеспечивало условия стабилизированного течения на входе в измерительную область. В участке для измерения напряжения трения на стенке  $\tau_w$  были вклеены и зашлифованы заподлицо со стенкой два электродиффузионных датчика [342, 356, 357].

Визуализационный блок представлял собой стеклянную трубу, помещенную в прямоугольный прозрачный корпус, заполненный для уменьшения оптических искажений иммерсионной жидкостью – дистиллированной водой. Теплообменный участок – труба из нержавеющей стали с толщиной стенки 0,2 мм и длиной 580 мм. Для нагрева поверхности участка производилась подача электрического тока с низковольтного трансформатора. Измерения температуры стенки производились с помощью 12 резистивных датчиков температуры M222, расположенных на расстоянии 1 см друг от друга по вертикали в центральной части участка. Для оценки нагрева жидкости при ее прохождении через рабочий участок, на его входе и выходе были установлены два дополнительных терморезистора. Участок был прокальброван при нагреве однофазного потока при разных расходах жидкости ( $Re=4000 \div 15000$ ). При обработке температурных данных учитывалась систематическая погрешность измерения, возникающая за счет различия температуры между внутренней и внешней стенками трубы. Полученные значения коэффициента теплообмена и числа  $Nu$  сравнивались с формулой Диттуса-Белтера:

$$Nu = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,43} \quad (26),$$

Где  $Nu$ ,  $Re$  и  $Pr$  – числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля соответственно. Наибольшее отклонение от рассчитанных данных наблюдалось при  $Re = 3000$ . При увеличении  $Re$  отклонение снижалось и в среднем не превышало 3% [358]. Сопротивление трубы  $\Omega=0,0272$  Ом было измерено с помощью мостовой схемы. Нагрев трубы производился с помощью электрического тока с силой  $I=112,5$  А. Мощность нагрева во время экспериментов составляла 345 Вт.

Расстояние между областями измерения трения и теплообмена по вертикали не превышало 600 мм. Расположение датчиков трения и теплообмена было смещено относительно друг друга на угол 180 градусов относительно оси трубы. Температура жидкости во время проведения экспериментов  $25 \pm 0,2^\circ\text{C}$ . Измерения расхода жидкости производились с помощью ротаметра, неопределенность измерений 2% от полной шкалы.

Расход газа устанавливался с помощью контроллера расхода газа Bronkhorst 5. Точность установления – 2% от измеряемой величины. Для изменения дисперсного состава газовой фазы использовался генератор пузырей из 24 капилляров. Диаметры капилляров 0,16 мм. Для ускорения потока в области отрыва пузырей, по оси трубы было установлено хорошо обтекаемое тело с внешним диаметром в области отрыва пузырей 14 мм. Оцененная неопределенность измерения составляла 7, 15, 10 и 4 %, для напряжения трения на стенке, его пульсаций, теплообмена и размеров пузырьков соответственно.

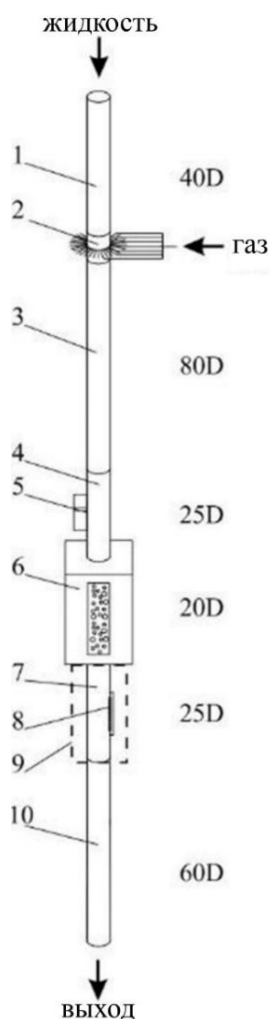


Рисунок 56 – Схема проведения измерений: 1 – входной участок; 2 – газожидкостный смеситель; 3 – труба; 4 – участок для измерения напряжения трения на стенке; 5 – блок с датчиками трения; 6 – визуализационный блок; 7 – нагреваемая труба; 8 – датчики температуры; 9 – теплоизоляция; 10 – выходной участок.

### 4.1.2 Распределение напряжения трения на стенке

Данные о распределении относительного напряжения трения на стенке  $\tau_w/\tau_0$ , где  $\tau_w$  – значения, полученные в двухфазном потоке, а  $\tau_0$  – экспериментальные данные о напряжении трения в однофазном потоке, приведены на рисунке 57. Измерения проводились при расходном газосодержании  $\beta = 0 \div 0,05$  и  $Re = 6000 \div 10000$ . Для рисунка 57 а средний размер пузырей равнялся  $\langle d_n \rangle = 0,7$  мм, для рисунка 57 б  $\langle d_n \rangle = 1,7$  мм. Линией на рисунке обозначена зависимость Арманда [359]. В рамках исследованных режимных параметров отношение  $\tau_w/\tau_0$  существенно зависит от размеров пузырей. При наличии в потоке пузырей малых размеров наблюдается снижение  $\tau_w$  по отношению к  $\tau_0$ . Данное снижение может достигать величин порядка 5-20%. Можно отметить, что увеличение  $Re$  приводит к перемещению данного эффекта в область более высоких  $\beta$ . Ранее подобные результаты были зафиксированы восемью датчиками напряжения трения на стенке, расположенными равномерно по азимуту в одном измерительном сечении [225], при  $D=15$  мм  $\beta=0,046$ ,  $\langle d_n \rangle = 0,44$  и  $Re = 7690$ . Однако, для остальных режимных параметров, рассмотренных в [225], напряжение трения на стенке либо превышало, либо равнялось  $\tau_0$ . При  $D=42,2$  мм [230, 231] измерения проводились при  $\beta$  выше 0,02 и расходной скорости жидкости  $V_{ж}$  выше 0,5 м/с ( $Re > 20000$ ), что может быть причиной отсутствия эффекта снижения  $\tau_w/\tau_0$  ниже единицы. При увеличении расхода газа регистрируется увеличение отношения  $\tau_w/\tau_0$  выше единицы.

Для более крупных пузырей увеличение  $\beta$  приводит к росту  $\tau_w/\tau_0$ . При этом  $\tau_w$  превышает  $\tau_0$  и результаты, полученные с помощью зависимости Арманда [359] даже при самых малых  $\beta$ . Снижение  $Re$  приводит к увеличению степени влияния газа на отношение  $\tau_w/\tau_0$ . При  $Re=6000$  и  $\beta=0,05$   $\tau_w$  превышает  $\tau_0$  на величину порядка 80%. Подобное влияние средних размеров дисперсных включений на  $\tau_w/\tau_0$  было получено ранее при  $D=42,2$  мм [230, 231].

На рисунках 58 а, б приведены данные о «степени турбулентности» в пристенной области  $\tau'/\tau$ , где  $\tau'$  – среднеквадратичное отклонение напряжения трения на стенке. Для однофазного потока регистрируемые значения составляют около  $0,33 \div 0,36$ . При добавлении газа происходит демпфирование турбулентности. Этот эффект более выражен при  $\langle d_n \rangle = 0,7$  мм. Увеличение  $\beta$  приводит к увеличению степени подавления турбулентности в пристенной области. При  $\beta=0,05$  минимальное значение  $\tau'/\tau$  достигает 0,125, 0,17 и 0,26 для  $Re = 6000, 8000$  и  $10000$  соответственно.

Для более крупных пузырей снижение степени пристенной турбулентности значительно меньше. Наблюдается лишь малое отклонение  $\tau'/\tau$  от значений, измеренных в однофазном потоке. Влияние  $Re$  также очень слабое. Приведенные данные о влиянии  $Re$  и  $\langle d_{\pi} \rangle$  на турбулентную структуру потока соответствуют [225, 230, 231, 236, 238, 239], где, в частности отмечено хорошее соответствие значений относительных пульсаций напряжения трения на стенке и скорости жидкости в пристенной области. Профили скорости жидкости, ее пульсаций и локального газосодержания для некоторых из исследованных режимов приведены в [238, 239].

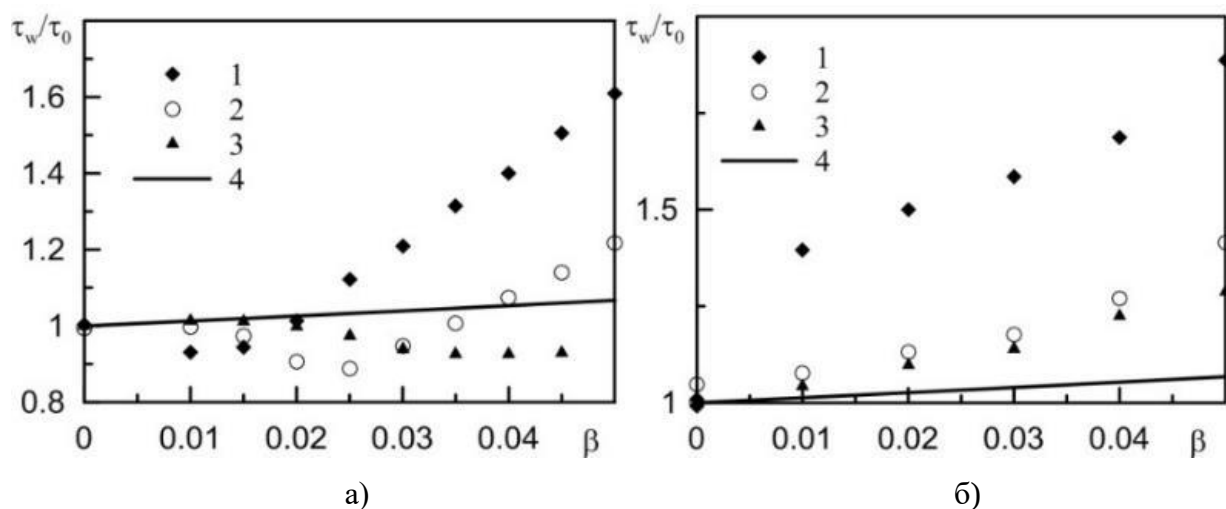


Рисунок 57 – Распределение напряжения трения на стенке при вариации скорости жидкости и расхода газа: а -  $\langle d_{\pi} \rangle = 0,7 \text{ мм}$ ; б -  $\langle d_{\pi} \rangle = 1,7 \text{ мм}$ . 1, 2, 3 –  $Re = 6000, 8000, 10000$ .

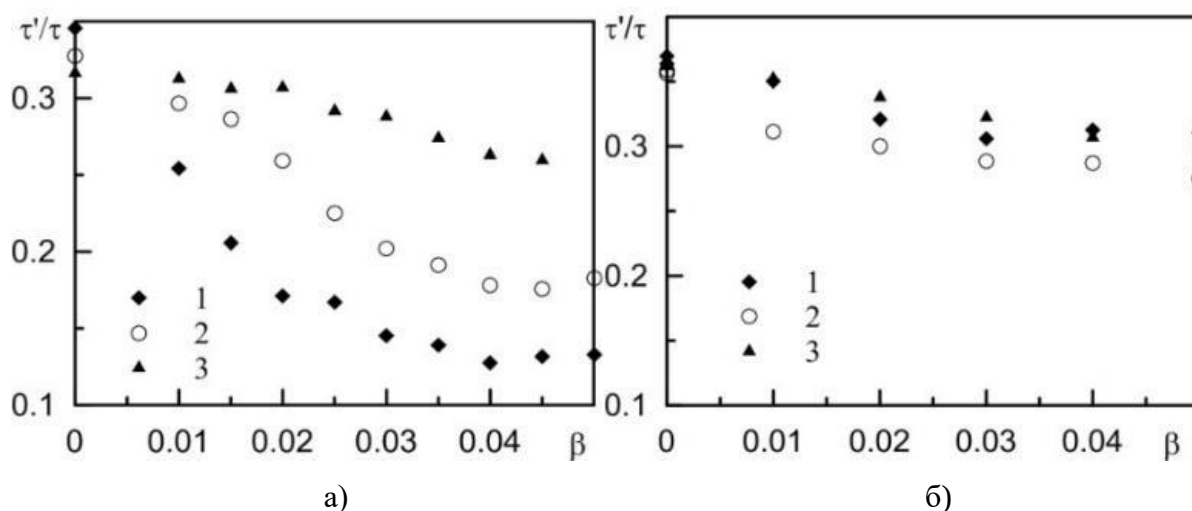


Рисунок 58 – Распределение относительных пульсаций напряжения трения на стенке при вариации скорости жидкости и расхода газа: а -  $\langle d_{\pi} \rangle = 0,7 \text{ мм}$ ; б -  $\langle d_{\pi} \rangle = 1,7 \text{ мм}$ . 1, 2, 3 –  $Re = 6000, 8000, 10000$ .

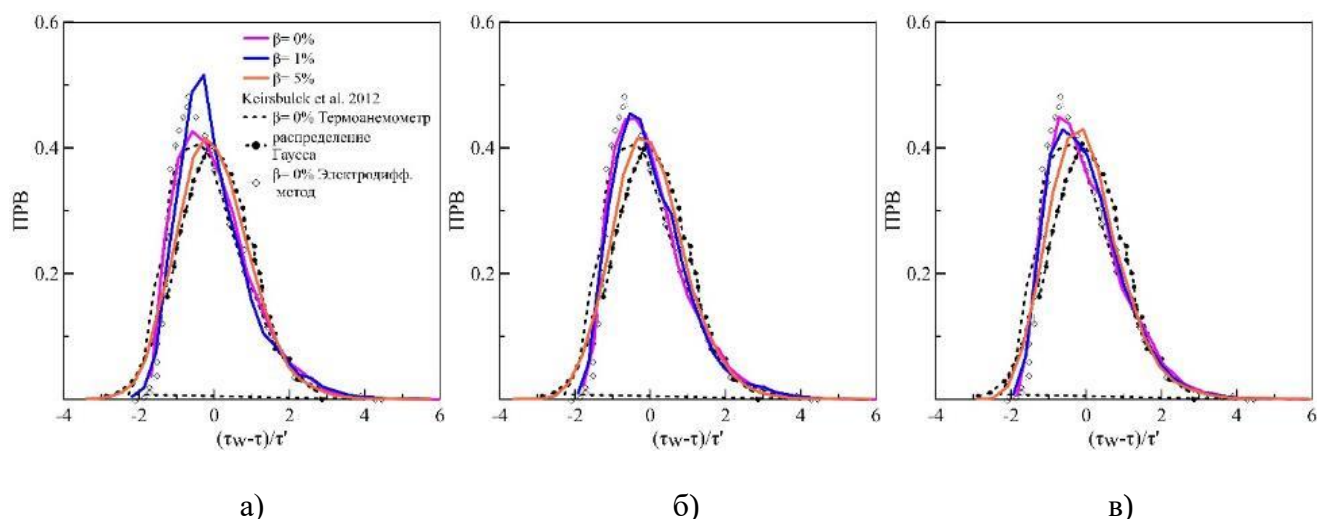


Рисунок 59 – Распределение пульсаций напряжения трения на стенке: а, б, в –  $Re = 6000, 8000, 10000$ .

Проведено сравнение с характеристиками поведения напряжения трения на стенке в однофазном потоке, представленными в работе [360]. В этой работе были рассмотрены результаты, полученные с помощью электродиффузионного метода, тонкопленочной анемометрии, а также DNS расчетов, полученных разными авторами. Плотность вероятности распределения пульсаций трения приведена на рисунке 59. В данном представлении форма кривой в однофазном потоке отличается от распределения Гаусса и зависимость несимметрична. Результаты экспериментов, показанные на рисунках в виде линий, находятся в хорошем соответствии с литературными данными, полученными с помощью различных методов. Измерения проводились при числах Рейнольдса потока 6000, 8000 и 10000, что близко к данным работы [360].

В двухфазном потоке форма кривой изменяется. При  $\beta=0,01$  это изменение незначительно, однако увеличение расходного газосодержания приводит к более равномерному распределению пульсаций, и кривая приближается к распределению Гаусса. Таким образом, наличие пузырей в потоке оказывает существенное влияние на распределение статистических характеристик напряжения трения на стенке. Наблюдается сильное отклонение от закономерностей течения однофазного потока, полученных в литературе и в данной работе.

Данные спектрального анализа сигнала датчика напряжения трения на стенке для однофазного потока и потоков с пузырями приведены в безразмерном виде  $f/S_0, WS_0/(\tau_w)^2$  [361], где  $f$  – частота,  $S_0=V^{*2}/\nu$ ,  $V^*=(\tau_w/\rho)^{1/2}$  – динамическая скорость,  $\rho$  – плотность жидкости,  $W$  – спектральная плотность на рисунке 60. Спектр сигнала, полученного в однофазном потоке,

находится в хорошем соответствии с результатами, представленными в [360], полученными с помощью различных методов.

Добавление пузырей приводит к изменению спектра сигнала. В области средних частот появляется область, соответствующая закону распределения  $1/f$  (фликкер-шум), что, возможно, является характерным для течений с микропузырьками [360]. А в области высоких частот кривая подчиняется законам  $f^{-3}$ , что было ранее показано для поведения характеристик пузырьковых потоков в литературе, а при больших газосодержаниях выполняется закон  $f^{-4}$ .

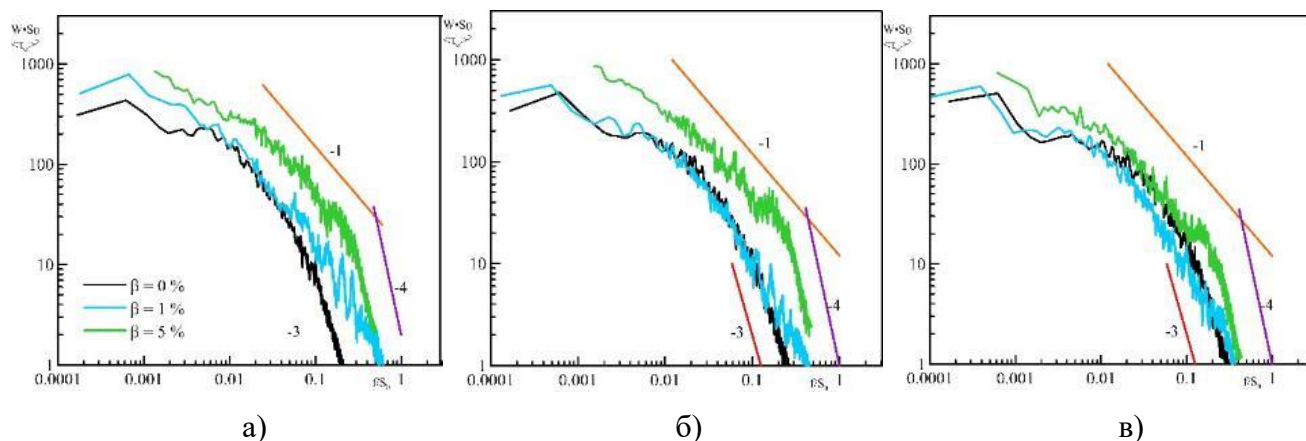


Рисунок 60 – Спектры пульсаций напряжения трения на стенке: а, б, в –  $Re = 6000, 8000, 10000$ .

#### 4.1.3 Влияние размера пузырей на гидродинамику потока и теплообмен при постоянных расходах жидкости и газа

Для проведения исследования влияния  $\langle d_p \rangle$  на характеристики потока, капилляры, через которые производилась подача газа, были разделены на восемь групп по три в каждой. В ходе эксперимента, при постоянном расходе газа, производилось поочередное отключение групп капилляров, и их количество  $N$  снижалось с 24 до 3. Таким образом, изменялся расход газа через каждый из оставшихся капилляров. При большем расходе газа происходит рост вероятности коалесценции пузырей и средний размер пузырей увеличивается [362]. Средняя скорость жидкости во время проведения экспериментов была фиксирована  $V_{ж} = 0,25$  м/с ( $Re = 5000$ ). Во время проведения экспериментов подавался постоянный расход газа  $Q_r = 50$  мл/мин ( $\beta = 0,01$ ).

Фотографии пузырей, полученные с помощью описанного метода и гистограммы распределения диаметров пузырей, приведены на рисунке 61. В верхней части изображений приведено соответствующее число открытых капилляров. Расход через единичный капилляр  $Q_{cap} = Q_r / N$  для  $N = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24$  соответствует 16,7, 8,3, 5,6, 4,2 3,3, 2,8, 2,4, 2,1 мл/мин.

Зависимость диаметра пузырей в потоке  $\langle d_p \rangle$  от  $Q_{\text{ср}}$  приведена на рисунке 62. При  $Q_{\text{ср}} < 4$  мл/мин реализуется режим отрыва пузырей, определяемый балансом сил на кромках капилляров. В этом режиме наблюдается слабая зависимость отрывного диаметра пузырей от расхода газа. Средний отрывной диаметр пузырей  $\langle d_p \rangle$  составляет  $0,45 \div 0,5$  мм. С увеличением  $Q_{\text{ср}}$  увеличивается количество случаев коалесценции пузырей вблизи кромки капилляров. С увеличением  $Q_{\text{ср}}$  до максимального значения,  $\langle d_p \rangle$  возрастает до 1,8 мм.

Изменения гидродинамической структуры и теплообмена [363], происходящие при добавлении в поток жидкости газовых пузырей разных размеров, можно оценить по данным, приведенным на рисунках 63, 64.

Добавление малых пузырей практически не приводит к изменению  $\tau_w$  в сравнении с однофазным потоком (см. рисунок 63). При увеличении  $\langle d_p \rangle$  наблюдается рост отношения  $\tau_w/\tau_0$  и для наибольшего из рассмотренных размеров пузырей это отношение превышает 2. Поведение кривой, описывающей теплообмен качественно подобно. Однако, следует выделить основные отличия. При малых  $\langle d_p \rangle$  наблюдается ухудшение теплообмена в сравнении с однофазным потоком. Данное наблюдение было проверено несколько раз. При прекращении подачи газа измеряемые значения коэффициента теплообмена соответствовали формуле Диттуса-Белтера. При возобновлении подачи газа регистрировалась более высокая разница температур жидкости на входе и нагреваемой стенки, что говорит об ухудшении теплообмена. При увеличении размеров пузырей наблюдается интенсификация теплообмена, однако отношение  $Nu/Nu_0$  достигает меньшего значения в сравнении с  $\tau_w/\tau_0$ , а именно  $\sim 1,5$ . Линиями на рисунке приведены данные расчёта, выполненные М.А. Пахомовым и В.И. Тереховым с помощью RANS моделирования [364].

Механизм увеличения напряжения трения на стенке (и коэффициента теплообмена) в нисходящем пузырьковом потоке был описан ранее [230, 238]. При добавлении пузырей в поток происходит перестроение профиля скорости жидкости, что приводит к увеличению градиента скорости жидкости в пристенной области, а соответственно и  $\tau_w$  и  $Nu$ .

В качестве причины, приводящей к ухудшению теплообмена при малых  $\langle d_p \rangle$  можно выделить значительное подавление турбулентных пульсаций в области вблизи стенки трубы (рисунок 64). Приведена зависимость относительных пульсаций напряжения трения на стенке  $\tau'/\tau$  от  $\langle d_p \rangle$ . Результаты для разных размеров пузырей приведены в виде символов, пунктирной линией приведены данные, измеренные в однофазном потоке. При малых  $\langle d_p \rangle$  значения  $\tau'/\tau$

находятся около 0,06. Увеличение размеров газовых включений приводит к росту турбулентных пульсаций напряжения трения до значений, характерных для развитого турбулентного течения.

В ряде работ отмечено, что добавление в нисходящий поток жидкости газовой фазы может приводить к подавлению турбулентности при числах Рейнольдса по жидкой фазе, соответствующих развитому турбулентному течению [238, 239]. Указанное явление более выражено при уменьшении размеров пузырей, что соответствует результатам, полученным в данном исследовании.

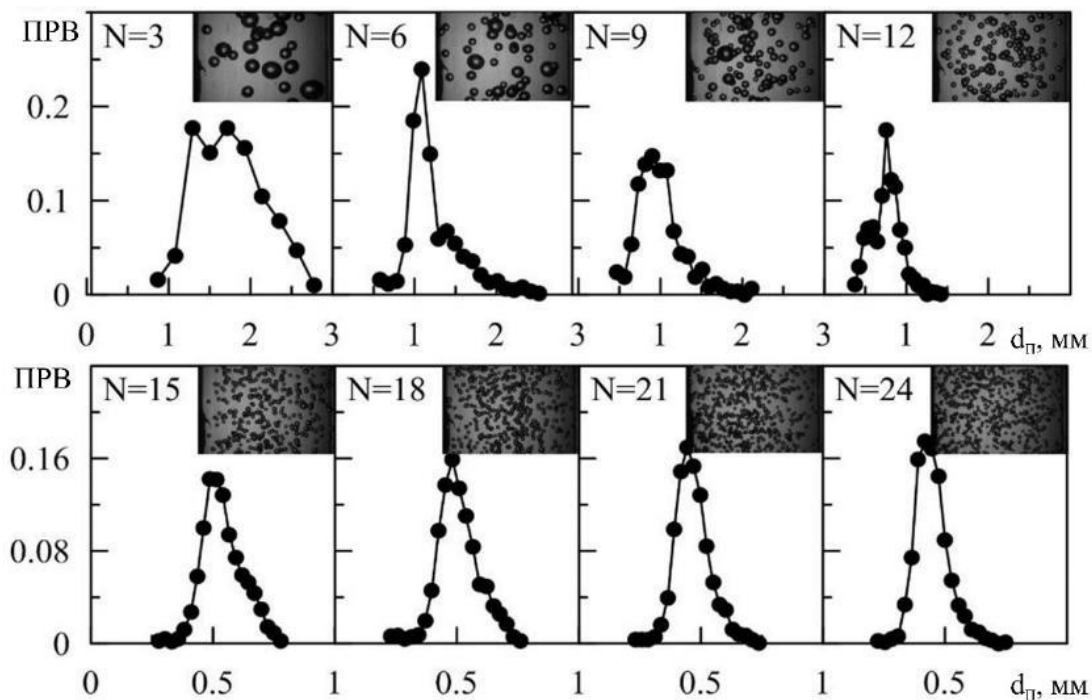


Рисунок 61 – Распределение размеров пузырей при разном количестве открытых капилляров.

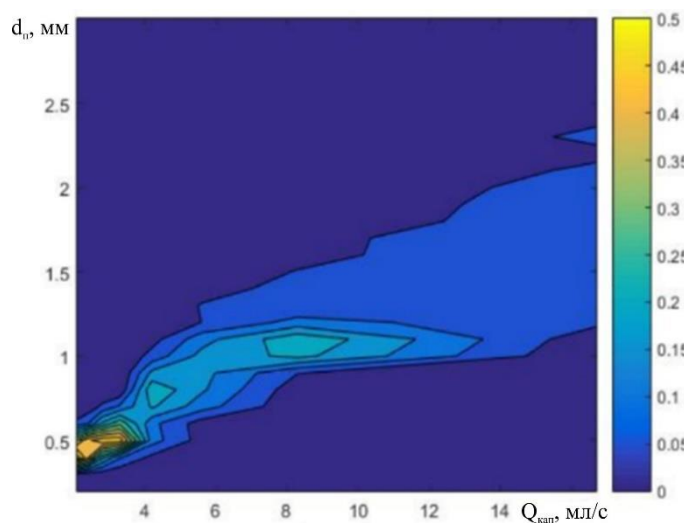


Рисунок 62 – Карта размеров пузырей при вариации расхода газа через капилляр.



Фрагменты сигналов датчиков напряжения трения на стенке в однофазном потоке, и потоках с максимальными и минимальными размерами пузырей приведены на рисунке 65. Для двух расположенных близко датчиков. темным цветом обозначен сигнал датчика, расположенного выше по потоку, синим сигнал датчика, расположенного ниже по потоку. можно видеть, что наблюдается хорошая корреляция сигналов датчиков. По сравнению с однофазным течением сигнал температуры при больших  $d_p$  имеет более высокий средний уровень. Частота пульсаций увеличена. При малых размерах пузырей средний уровень  $\tau_w$  практически соответствует  $\tau_0$ , однако в сигнале не наблюдается низкочастотных пульсаций, сигнал датчика практически линеен.

Для однофазного потока спектр мощности имеет вид, близкий к классическому (рисунок 66 а). В области малых частот наблюдается слабая зависимость  $WS_0/(\tau_w)^2$  от частоты [365]. При повышении частоты наблюдается затухание с законом, близким к  $-5/3$ . В двухфазном пузырьковом потоке можно условно разделить спектр сигнала на три области (рисунок 66 б-е): 1 - область малых частот; 2 - область, подчиняющаяся закону  $-1$ ; 3 - область спектра с затуханием, подчиняющимся закону  $-8/3$  или  $-7/3$ . Подобные данные приведены для напряжения трения на стенке в пузырьковом восходящем потоке [366]. При исследовании каскада энергии турбулентности в восходящем и нисходящем течениях методом PIV в пристенной области также получены подобные данные [367]. Уменьшение  $\langle d_p \rangle$  приводит к переходу высокочастотной области спектра от зависимости  $-8/3$  к  $-7/3$ . При этом диапазон частот, при которых зависимости подчиняются этим законам, уменьшается, а диапазон средних частот, где наблюдается зависимость  $-1$ , расширяется. При самых малых размерах пузырей практически весь спектр можно описать законом  $-1$ .

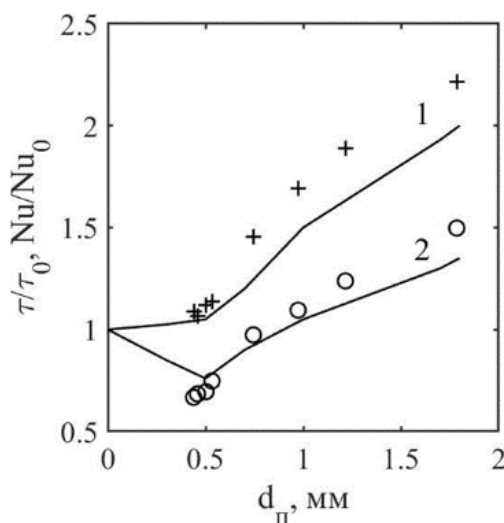


Рисунок 63 – Экспериментальные и численные данные о распределении коэффициентов трения (1) и теплообмена (2) при постоянных расходах жидкости и газа и вариации размеров пузырей.

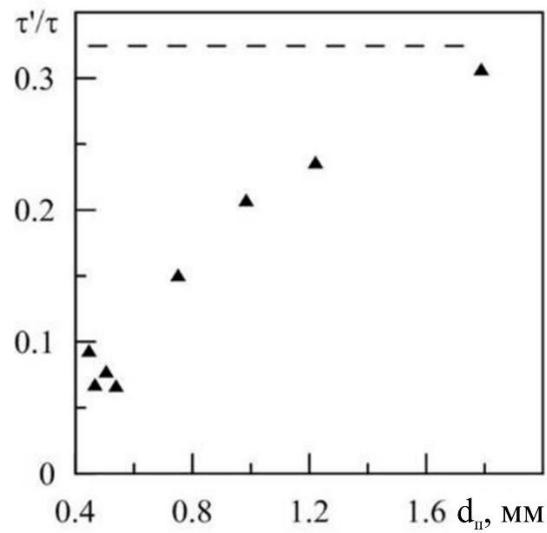


Рисунок 64 – Относительные пульсации напряжения трения на стенке при вариации размеров пузырей в потоке.

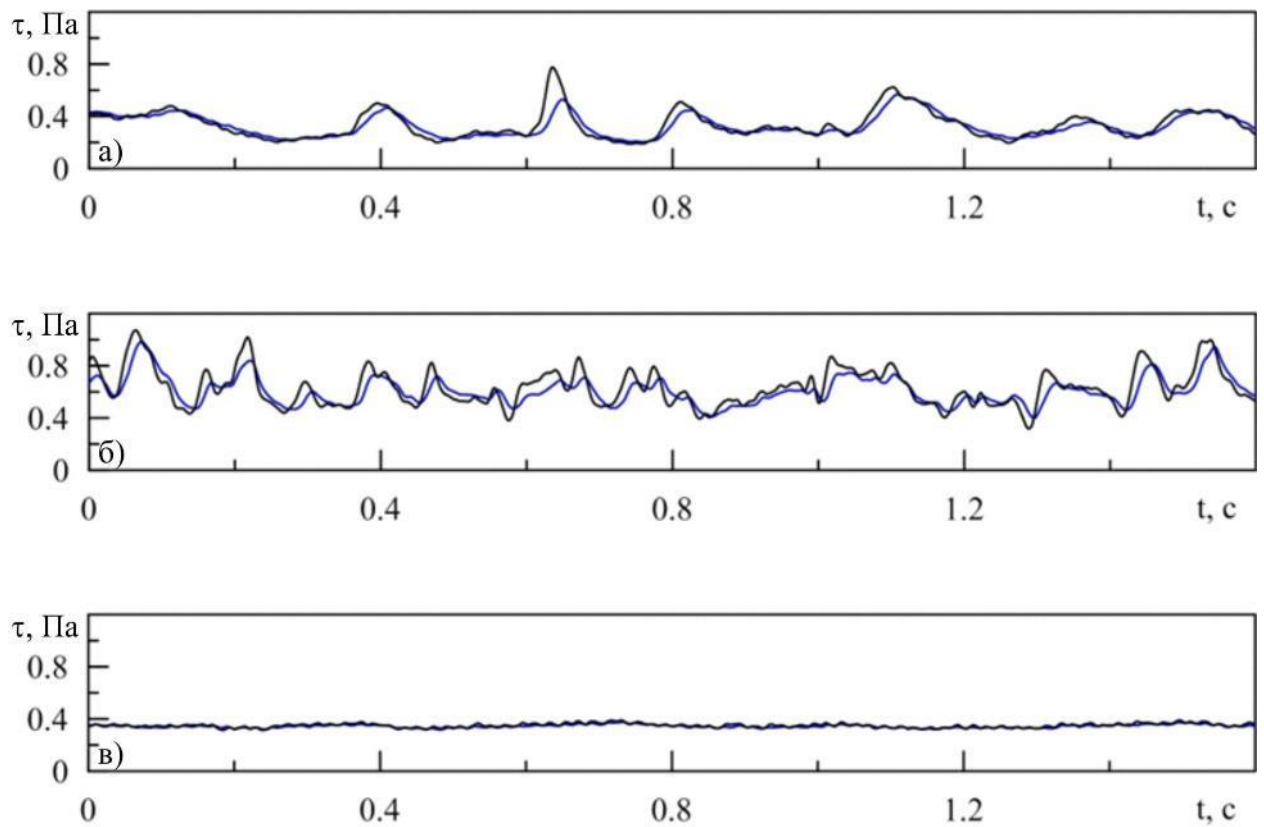


Рисунок 65 Временные зависимости напряжения трения на двух датчиках: а – однофазный поток; б –  $\langle d_{п} \rangle = 1,2$  мм; в –  $\langle d_{п} \rangle = 0,48$  мм.

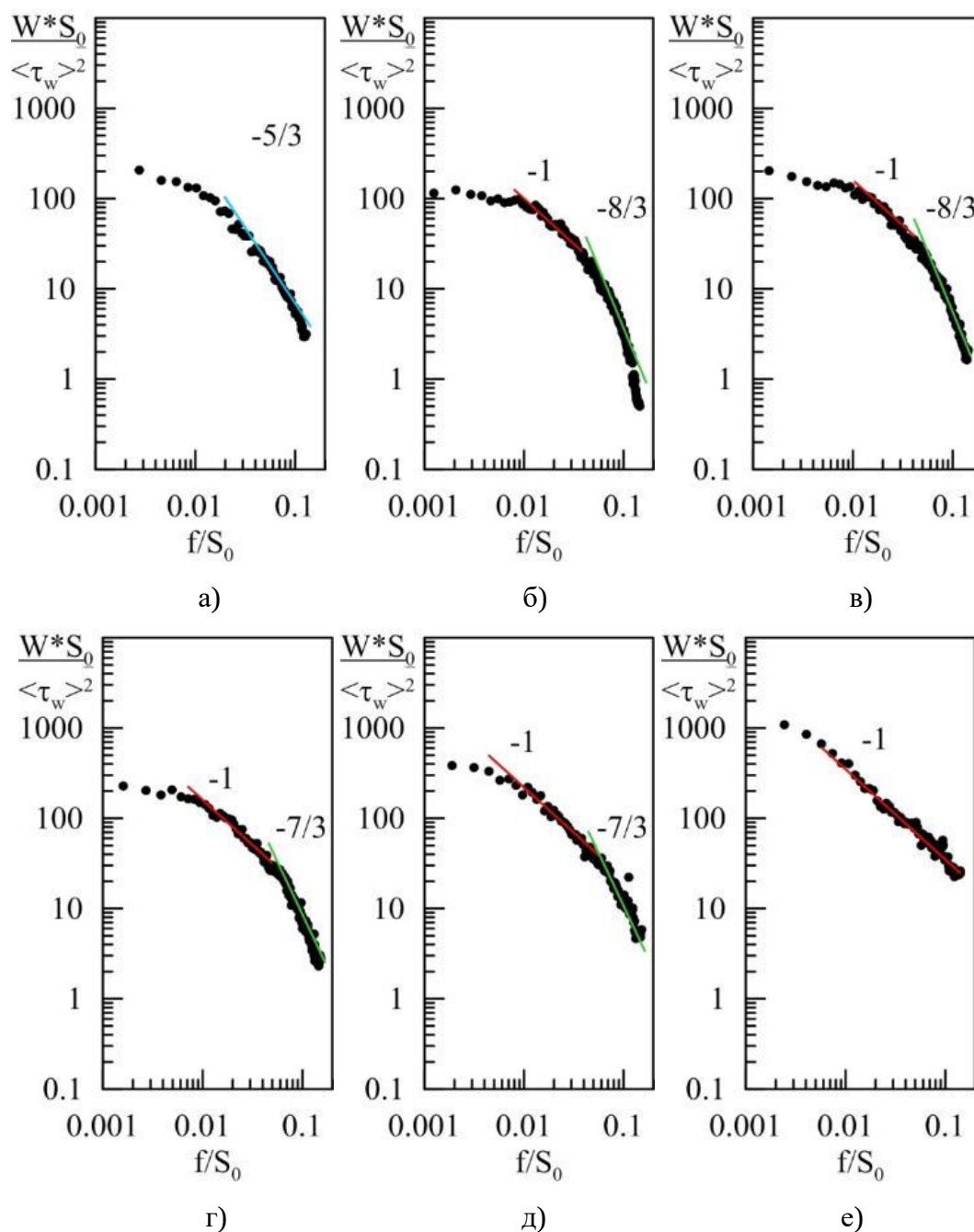


Рисунок 66 - Спектральные характеристики сигнала при разном размере пузырей: а –  $\langle d_b \rangle = 1,8$  мм; б –  $\langle d_b \rangle = 1,2$  мм; в –  $\langle d_b \rangle = 1$  мм; г –  $\langle d_b \rangle = 0,75$  мм; д –  $\langle d_b \rangle = 0,54$  мм; е –  $\langle d_b \rangle = 0,48$  мм.

Проведены исследования теплообмена от нагреваемой стенки к нисходящему пузырьковому потоку с помощью метода инфракрасной термографии при  $Re = 5000$ . Результаты распределения температуры стенки при одинаковых расходах воды и газа приведены на рисунке 67. Крайняя левая картина соответствует тепловому полю для однофазного потока, уменьшение размеров пузырей производилось слева направо. Можно видеть, что уменьшение размеров пузырей приводит к изменению теплообмена от его интенсификации (меньшая температура стенки в сравнении с однофазным потоком), до подавления (увеличение температуры стенки).

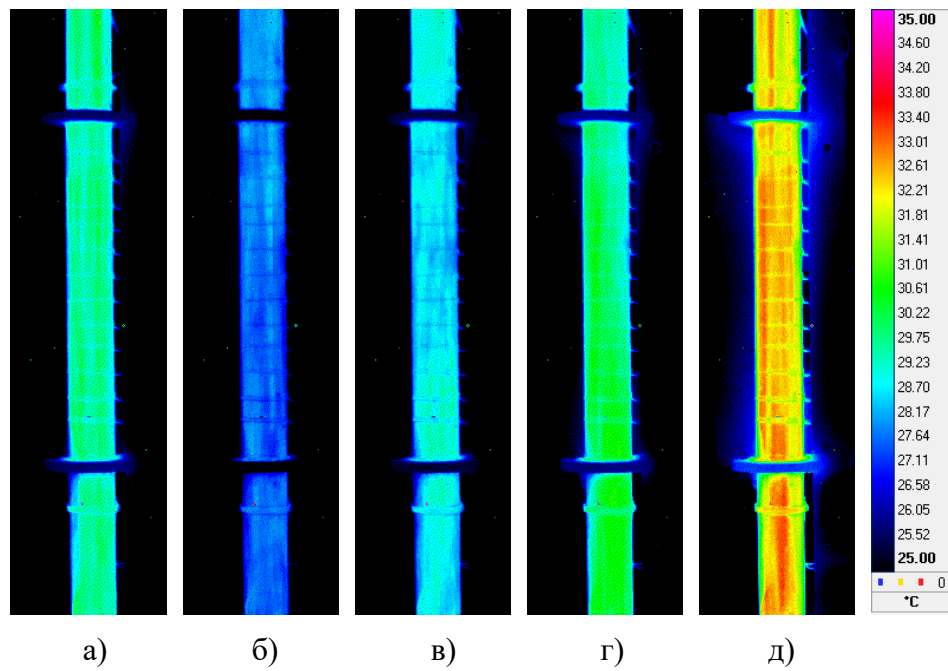


Рисунок 67 – Температура нагреваемой стенки при вариации размеров пузырей: а – однофазный поток; б –  $d_{\text{п}} = 2.2$  мм; в –  $d_{\text{п}} = 1.2$  мм; г –  $d_{\text{п}} = 0.6$  мм; д –  $d_{\text{п}} = 0.4$  мм.

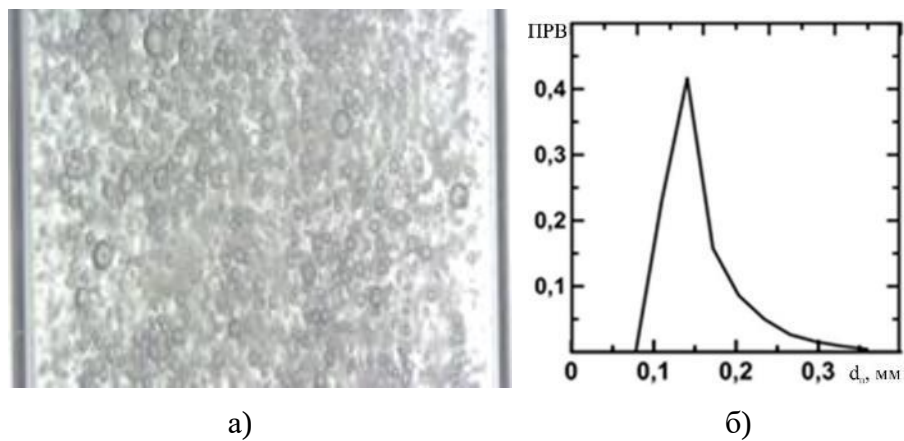


Рисунок 68 – Распределение размеров пузырей с малым диаметром в потоке: а – фотография потока; б – гистограмма распределения размеров пузырей.

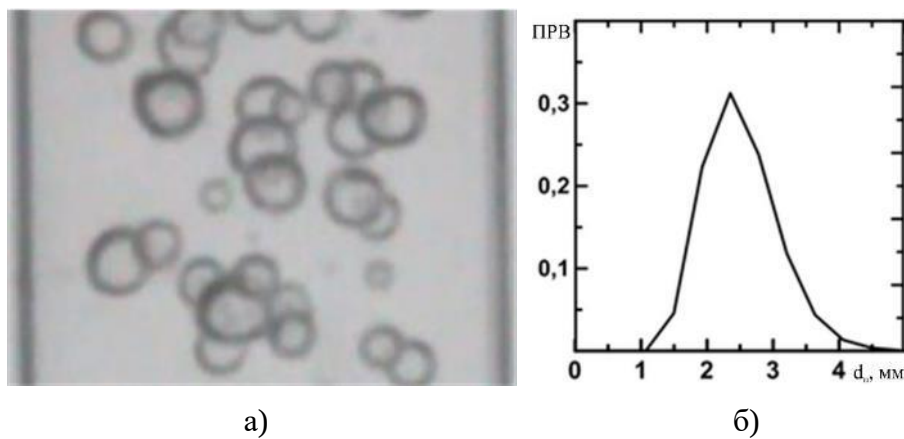


Рисунок 69 – Распределение крупных пузырей в потоке: а – фотография потока; б – гистограмма распределения размеров пузырей.

Проведены детальные исследования явлений интенсификации и подавления теплообмена пузырькового нисходящего потока. При проведении экспериментов варьировались расходы жидкости и газа. Число Рейнольдса в ходе экспериментов изменялось в диапазоне  $5000 \div 12000$  с шагом 1000. Для выявления максимальных эффектов эксперименты проводились при минимальных и максимальных размерах пузырей, которые можно было получить. Минимальный размер ограничивался количеством капилляров, которые могли быть установлены в поперечном сечении трубы без их перекрытия, т.к. перекрытия приводят к интенсификации коалесценции. Максимальный размер пузырей выбирался таким образом, чтобы при минимальном  $Re$  и максимальном  $\beta$  не происходил переход к снарядному режиму течения. Переход к снарядному режиму течения при наименьшем расходе жидкости и наиболее крупных пузырях являлся ограничением  $\beta < 0,05$ .

Размеры пузырей контролировались в каждом эксперименте. Типичные фотографии потоков и гистограммы размеров пузырей приведены на рисунках 68 - 69. В экспериментах средний размер малых пузырей находился в диапазоне  $0,17 \div 0,2$  мм, средний диаметр крупных пузырей был около 2,5 мм.

Результаты измерений для потоков с разной дисперсностью газовых включений приведены на рисунках 70 а, б. При добавлении в поток крупных пузырей наблюдается интенсификация теплообмена, что особенно выражено для малых  $Re$ . Можно видеть, что добавление достаточно малого количества газа в поток может приводить к интенсификации теплообмена примерно в два раза. Данные об интенсификации коэффициентов трения и теплообмена двухфазных потоков известны в литературе [230, 358, 368]. При относительно высоких  $Re$  влияние газовых добавок практически не выражено.

При добавлении в поток пузырей малых размеров картина существенно отличается. Наблюдается существенное ухудшение теплообмена, причем при малых  $Re$  величина минимального значения  $Nu$  примерно постоянна и составляет около  $50 \div 60\%$  от коэффициента теплообмена в однофазном потоке. Для достижения режима подавления теплообмена необходимо увеличивать  $\beta$  с увеличением  $Re$ . Как и для потока с пузырями крупных размеров, при  $Re$  выше 10000 добавление газа в поток на теплообмен практически не влияет.

С помощью PIV были проведены исследования распределений скорости жидкости в нисходящем пузырьковом потоке. Использовалась система «Полис-PIV». Рабочий участок - труба из органического стекла с внутренним диаметром 20 мм. Вокруг трубы был смонтирован прозрачный бокс из органического стекла, заполненный иммерсионной жидкостью для снижения оптических искажений.

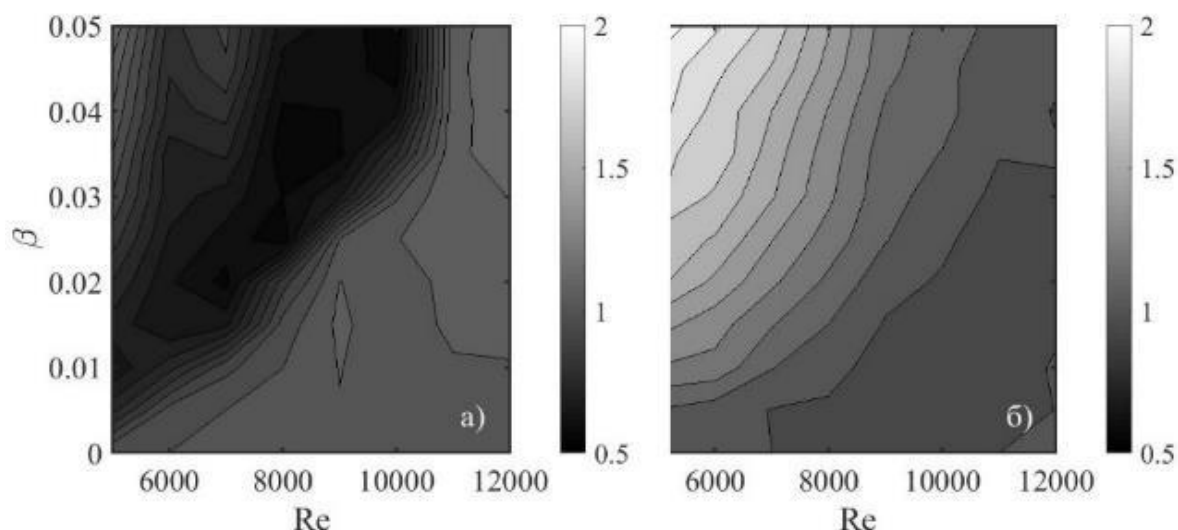


Рисунок 70 – Относительный коэффициент теплообмена для потоков с мелкими (а) и крупными (б) пузырями.

Для определения пузырей применялся метод планарной лазерно-индуцированной флуоресценции (PLIF) [369]. Были использованы флуоресцентные частицы из полиметилметакрилата, заполненного родамином В, производства Dantec Dynamics (гидрофобные, распределение по размерам  $1 \div 20$  мкм, диапазон длин волн  $550 \div 700$  нм). Пороговый оптический фильтр был использован для предотвращения бликов от поверхности пузырьков на конечных изображениях.

Двести пар изображений PIV были получены для разных тестовых случаев [370]. Число Рейнольдса поддерживалось равным 5000. Было выполнено три серии экспериментов в однофазном и двухфазном пузырьковом потоке ( $Re = 5000$ ,  $\beta = 0$  и  $0,01$ ). Эксперименты в двухфазном потоке были выполнены с использованием двух групп размеров пузырьков.

Минимальный размер пузырей был ограничен тем, что при слишком малых пузырях поток представляет собой малопрозрачную взвесь. В однофазном потоке максимум скорости жидкости находится в центре потока, профиль скорости имеет параболический вид. При добавлении мелких пузырей в поток профиль скорости выравнивается по сечению трубы, что говорит о формировании «стержневого» течения [225]. Можно видеть, что пузыри равномерно распределены по сечению трубы, кроме достаточно тонкой области чистой жидкости вблизи ее стенки.

Баланс сил, действующих на пузыри в двухфазном потоке [229], приводит к тому, что пузыри собираются в центральной области трубы и ширина свободного слоя жидкости вблизи стенок увеличивается. Скопление пузырей в центральной области канала создает препятствия потоку жидкости, что ведет к ее перетечке в периферийную область и, соответственно,

увеличению скорости жидкости в пристенной области. Поэтому происходит переход профиля скорости жидкости от параболического к профилю с максимумами вблизи стенок трубы [233].

Для распознавания пузырей применялось преобразование Хафа (Hough transform) [371, 372]. С помощью автоматического порога производилась бинаризация исходного изображения двухфазного потока, полученного с помощью методов PIV/PLIF. Можно заметить, что пузыри на бинарном изображении принимают форму полукольца (см. рисунки 71 и 72). Это связано с тем, что они перекрывают траекторию лазерного ножа, и за пузырями возникает тень.

Как можно видеть, происходит успешное распознавание образов пузырей, количество не учтенных и ошибочно определенных пузырей крайне мало. Для удаления частиц, находящихся на поверхности пузырей, необходимо вычесть из изображения области, радиус которых на 20-40% больше, чем радиус пузырей. Ранее было показано, что реальный размер сферического пузыря превышает диаметр пузыря, полученный с помощью комбинации методов PIV/PLIF в 1,44 раза [373]. Средний диаметр  $\langle d_p \rangle$  для «малых» и «крупных» пузырей составлял 1,2 и 2,1 мм соответственно (см. рисунок 73). Форма гистограмм не подобна нормальному распределению, что связано с коалесценцией пузырей и образованию пузырей с кратными объемами [362]. Неопределенность измерения размеров пузырей составляла порядка 5-10% в зависимости от их размеров.

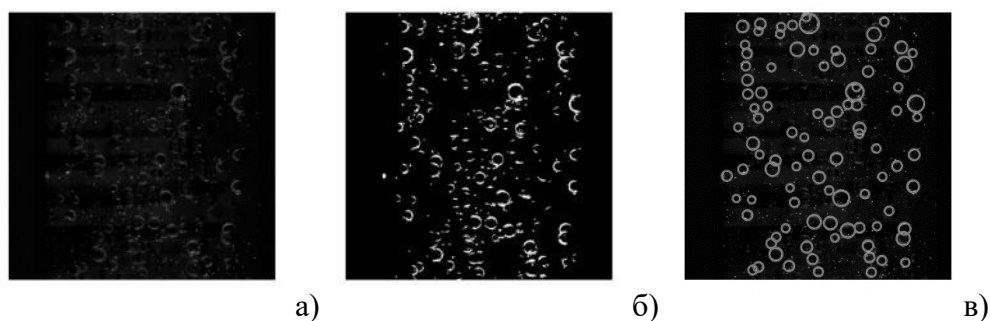


Рисунок 71 – Идентификация пузырей малых размеров в потоке: а – исходное изображение после вычитания осредненной интенсивности; б – бинарное изображение; в – изображение с распознанными пузырями.

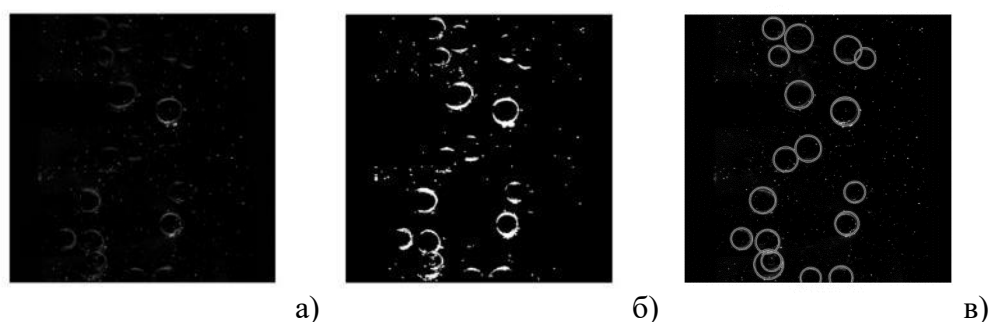


Рисунок 72 – Идентификация крупных пузырей в потоке (обозначения, как на рисунке 71).

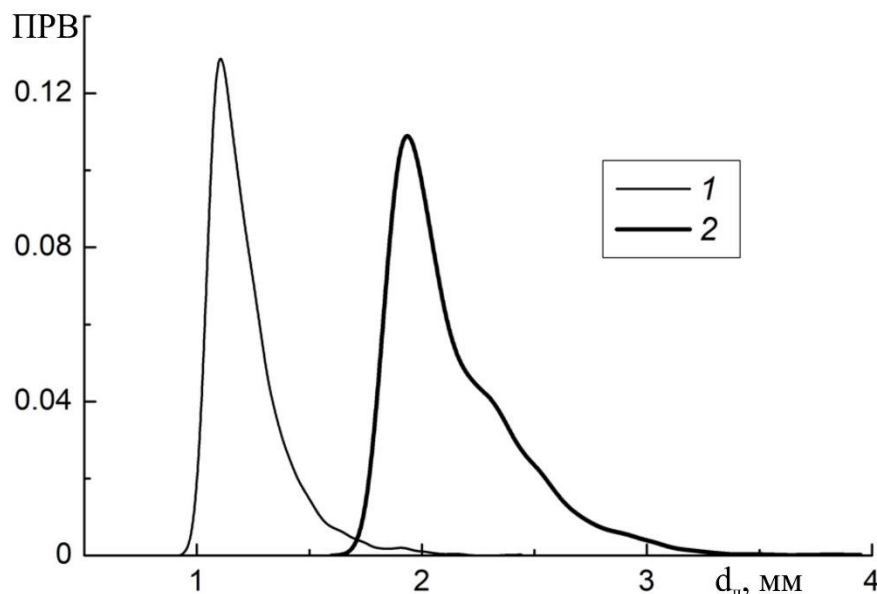


Рисунок 73 – Распределение пузырей по размерам: 1 –  $\langle d_p \rangle = 1,2$  мм; 2 –  $2,1$  мм.

После нахождения пузырей производилась обработка пар изображений двухфазного потока с использованием программного комплекса ActualFlow (см. рисунок 70). Применялась процедура вычитания поля средней интенсивности, усредненного по всему диапазону выборки. Обработка изображений проводилась с помощью итерационного алгоритма взаимной корреляции. Перекрытие составило 75%, размер окна 64х64 пикселя. Использованы следующие процедуры валидации: валидация пика с порогом 1,2, адаптивный медианный фильтр 3х3 и валидация диапазона с учетом максимальной скорости на оси малой трубы, умноженной на коэффициент 1,2. Неопределенность измерений скорости жидкости составляла около 5%.

Проведено сопоставление экспериментальных данных с расчетами, выполненными в ИТ СО РАН [370]. Профили аксиальных осредненных (б), пульсационных (в) скоростей фаз и локального газосодержания по сечению трубы приведены на рисунке 75, где  $y$  – расстояние от стенки и  $R$  – радиус трубы. На рисунке 75 б приведены данные о распределении аксиальных осредненных скоростей фаз в потоках. Точки – экспериментальные данные, линии – результаты численных расчетов: линия 1 – скорость однофазной жидкости при прочих идентичных условиях, линии (2 и 3) – расчет для двухфазного потока, пунктир (3) – скорость воздушных пузырьков.

Пульсационные характеристики потока показаны на рисунке 75 в. Для однофазного потока значения  $u'/U$  в пристенной области составляют примерно 0,3, а в центре трубы 0,05, что соответствует приведенным в литературе данным [225, 230, 231, 236]. В центральной области пузырькового потока с малыми пузырями наблюдается практически равномерное распределение. В этой области величина  $u'/U \approx 0,11$ . Добавление в поток более крупных пузырей приводит к



большому возмущению течения в центральной области. Здесь величина интенсивности пульсаций скорости жидкой фазы  $u'/U \approx 0,15$ . Найденные в литературе параметры при близких расходных характеристиках жидкости и газа составляют  $u'/u = 0,1 \div 0,2$ .

Наблюдается хорошее качественное и удовлетворительное количественное согласие между данными численного анализа и результатами экспериментов для двух различных размеров пузырьков как для осредненных, так и для пульсационных характеристик двухфазного течения [370].

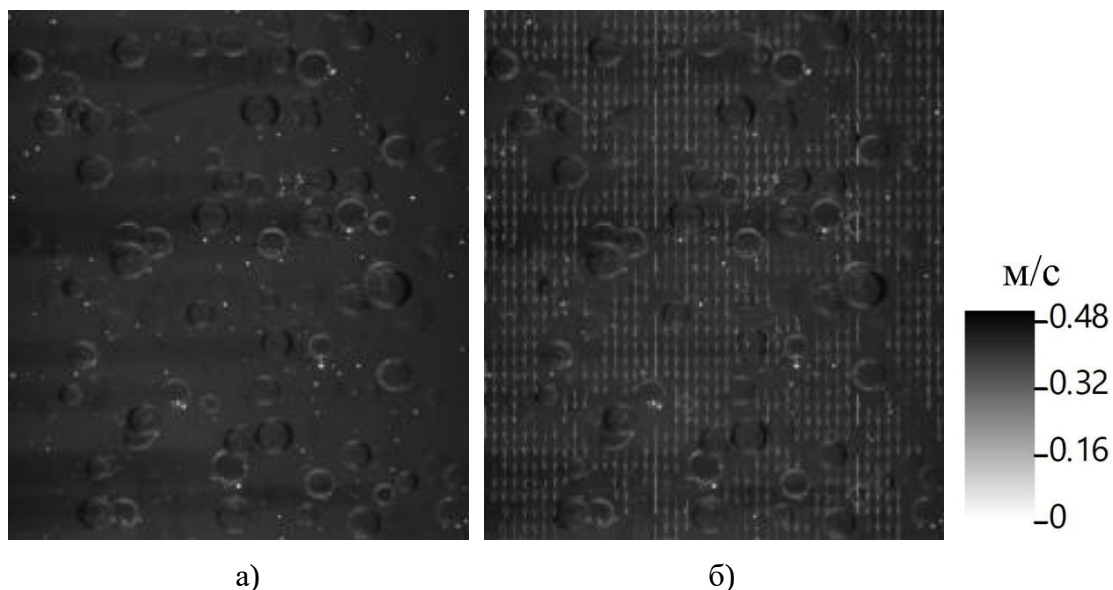


Рисунок 74 – Изображение потока (а) и мгновенное поле скорости (б) в нисходящем пузырьковом потоке.

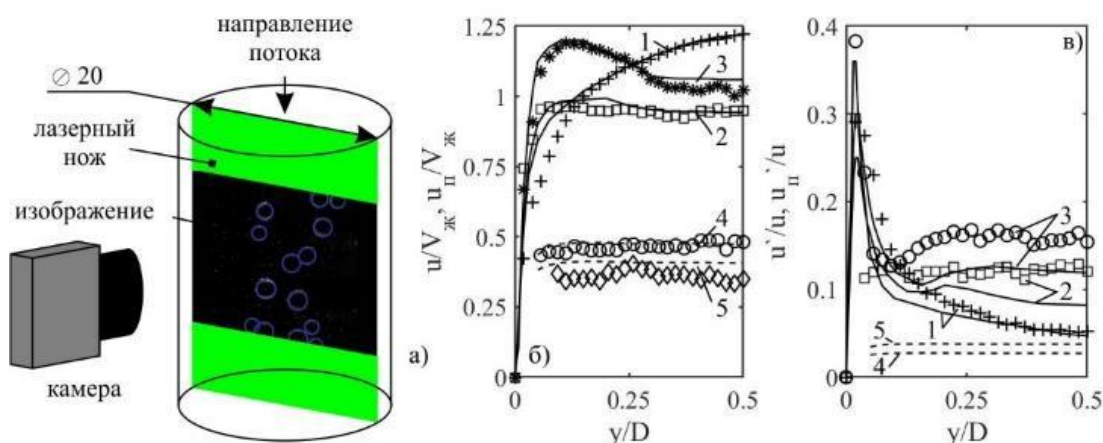


Рисунок 75 – Схема проведения измерений (а), распределение скорости жидкости (б) и пульсационных характеристик жидкой и газовой фазы (в) в нисходящем потоке при  $Re = 5000$ ,  $\beta = 1\%$ . Точки – эксперимент, линии – расчет: сплошные линии несущая фаза, пунктирные – газовые пузыри. (а): 1 – однофазный поток; 2 –  $\langle d_n \rangle = 1,2$  мм; 3 – 2,1 мм; 4, 5 – средние скорости малых ( $\langle d_n \rangle = 1,2$  мм) и крупных ( $\langle d_b \rangle = 2,1$  мм) пузырей. (б): 1 – однофазный поток; 2, 3 – пульсации жидкости при  $\langle d_n \rangle = 1,2$  мм и 2,1 мм, 4, 5 – расчетные пульсации малых ( $\langle d_n \rangle = 1,2$  мм) и крупных ( $\langle d_n \rangle = 2,1$  мм) пузырей.

## 4.2 Структура течения и теплообмен в трубе с внезапным расширением

### 4.2.1 Описание экспериментального стенда для исследования отрывного пузырькового потока

Экспериментальный стенд представлял собой циркуляционный контур (см. рисунок 76). Для подачи жидкости из бака 1 в напорную линию 3 применялся центробежный насос 2. Расход жидкости задавался с помощью вентиля 4 и измерялся с помощью ультразвукового расходомера «Карат 32» 5.

Формирование пузырей осуществлялось с помощью подачи газа в поток жидкости через 12 капилляров длиной 50 мм ( $d_{\text{вн}}=0,7$  мм), равномерно распределенных в сечении смесителя 6. Расход газа контролировался расходомером Brounckorst с диапазоном расходов до 1000 мл/мин 7. Погрешность измерения расходов жидкости и газа составляла  $\pm 2$  % от измеряемой величины. Рабочий участок установки состоит из трубы малого ( $d_{\text{вн}}=15$  мм) диаметра 8, соединенного с помощью втулки с трубой большего ( $d_{\text{вн}}=42$  мм) диаметра 9. Высота ступеньки  $H = 13,5$  мм. Эксперименты проводились при числах Рейнольдса, рассчитанных по высоте ступеньки  $Re_H = 10200, 20700$  и  $31500$ . Для каждого  $Re$  проводились измерения при одинаковых расходах газа  $Q_g = 1,7, 5, 10, 15$  мл/с. Расстояние от генератора пузырей до области съежек около 70 калибров трубы, что позволяет считать двухфазное течение установившимся. Для уменьшения оптических искажений использован бокс, заполненный иммерсионной жидкостью 10. Съёмка потока производилась с помощью скоростной камеры 11.

Рабочий участок 12 для измерения теплообмена между нагреваемой стенкой и потоком был изготовлен из нержавеющей стали с толщиной стенки 0,2 мм [371, 372]. Длина области обогрева 500 мм. Электрическое питание для нагрева рабочего участка подавалось с помощью лабораторного источника питания (ЛАТР), мощностью до 2 кВт. К источнику был подключен понижающий трансформатор, позволяющий подавать на рабочий участок переменный ток в пределах  $300 \div 350$  А при напряжении  $2 \div 2,2$  В. Измерение силы тока производилось с помощью измерительного трансформатора, напряжение на рабочем участке - с помощью прецизионного мультиметра с погрешностью измерения 0,02 В.

Температура стенки измерялась с помощью ИК камеры Fluke Ti32 (14). На внешнюю поверхность нагревательного участка была нанесена матовая черная краска. С противоположной стороны рабочего участка установлены 3 терморезистора Pt1000 на расстояниях  $x/H = 5, 17$  и  $30$ . Они были прижаты к поверхности трубы через слой термопасты. Вокруг терморезисторов была

установлена теплоизоляция для предотвращения взаимодействия с окружающей средой. Полученные с помощью разных методов результаты находятся в хорошем соответствии.

Эксперименты проводились следующим образом:

- 1) выставлялся необходимый расход жидкости;
- 2) производилась запись пяти термограмм при отсутствии нагрева;
- 3) при необходимости производилась добавка в поток газовой фазы и подавалось напряжение на рабочий участок;
- 4) по истечении времени, необходимого для установления потока, производилась запись 20 термограмм;
- 5) нагрев отключался и в течение двух минут производилась запись 5 термограмм.

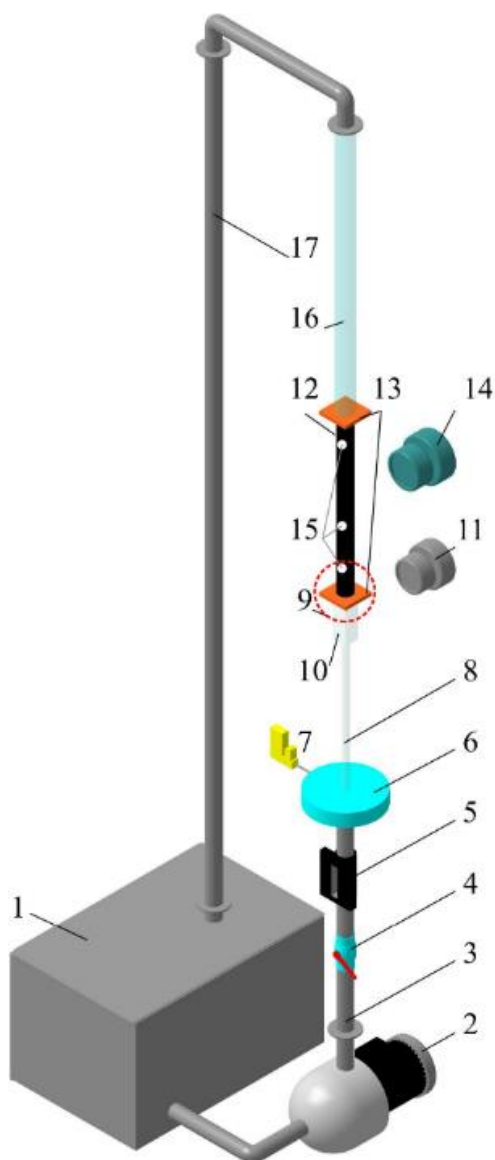


Рисунок 76 – Схема рабочего участка и схемы проведения экспериментов.

Одновременно производилась запись температур на входе и выходе в рабочий участок. Затем цикл измерений повторялся. Учитывая осевую симметрию потока, при обработке термограмм производилось осреднение по вертикали области, соответствующей всей высоте рабочего участка и расстояния от оси симметрии  $\pm 20\%$  от диаметра трубы после расширения. С использованием известного теплового потока на стенке, температур на входе и выходе рабочего участка и поля распределения температуры рабочего участка производились расчеты коэффициента теплообмена и числа Нуссельта. Число Нуссельта рассчитывалось по следующему соотношению для случая  $q_{\text{ст}} = \text{const}$ :

$$Nu = Hq_{\text{ст}}/[\lambda(T_{\text{ст2}} - T)] \quad (27),$$

Здесь  $H$  – высота уступа,  $q_{\text{ст}}$  – плотность теплового потока на стенке трубы,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности жидкости и  $T_{\text{ст2}}$  и  $T$  – температуры стенки и жидкости на оси трубы во входном сечениях соответственно.

При проведении экспериментов производилось неоднократное измерение температуры стенки рабочего участка без нагрева (всего более 100 измерений). Температура жидкости в баке до и после измерительного участка была  $25 \pm 0,1$  °С, температура окружающей среды  $\sim 27,5$  °С. При этом отклонение температуры стенки канала, определенное с помощью инфракрасной термографии находилось в пределах  $t_{\text{ст}} = 25 \pm 0,15$  °С. Для подтверждения этих данных были проведены измерения температуры стенки при разных температурах жидкости на входе ( $t = 25 \div 30$  °С). Отклонение температуры также не превышало  $\pm 0,15$  °С. Таким образом, неопределенность измерения температуры стенки с помощью тепловизора составляла  $\pm 0,15$  °С. Измеряемая разница температур потока и стенки жидкости в зависимости от режима течения и области исследования находилась в пределах  $1,7 \div 8$  °С, что приводит к неопределенности определения разницы температур стенки от  $\pm 9\%$  в области присоединения потока до  $\pm 2\%$  в остальных регионах.

#### 4.2.2 Гидродинамика и теплообмен отрывного пузырькового потока

С помощью метода планарной лазерно-индуцированной флуоресценции было показано, что при формировании в трубе малого диаметра т.н. седлообразных профилей газосодержания они сохраняются и в трубе большего диаметра (см. рисунок 77).

Форма пузырей за внезапным расширением трубы значительно отличается от круга или эллипса (см. рисунок 78). Поэтому съемка для определения диаметров пузырей производилась до расширения трубы. Изображения получены с помощью теневой съемки потока. Этапы

обработки изображений приведены на рисунке 79. Производилась бинаризация исходного изображения и последующее распознавание пузырей с помощью алгоритма Хафа. Гистограммы распределения размеров пузырей приведены на рисунке 80. В зависимости от расходов газа и жидкости средний диаметр пузырей находился в пределах  $1,6 \div 2,3$  мм. Многие гистограммы имеют два пика, соответствующие двукратной разнице в объемах пузырей. Это говорит о коалесценции пузырей в процессе их генерации [374].

Проведены сравнения с расчетами ИТ СО РАН [371, 372]. Был использован RANS подход, учитывающий влияние пузырей на характеристики течения. Расчет турбулентности несущей фазы производился с применением уравнений переноса Рейнольдсовых напряжений.

Распределение локального параметра интенсификации теплообмена ( $Nu/Nu_{0\text{макс}}$ ), где  $Nu_{0\text{макс}}$  – максимальное значение, зафиксированное в однофазном потоке, приведено на рисунке 81. Точками показаны экспериментальные данные пунктирные и непрерывные линии – результаты расчетов для одно- и двухфазного потока соответственно.

Обнаружено значительное увеличение интенсивности теплообмена, достигающее почти 3-х раз в области релаксации потока, для случая  $Re_H = 10200$  и величине объемного расходного газосодержания  $\beta = 10,1\%$  (см. рисунок 81 а). Ранее обнаружено значительное возрастание напряжения трения на стенке в двухфазном потоке даже при крайне малых газосодержаниях [368, 375, 376]. С ростом числа Рейнольдса до 20700 в двухфазном пузырьковом течении наблюдается увеличение интенсивности теплопереноса (см. рисунок 81 б). При увеличении числа Рейнольдса характерным является снижение величины интенсификации теплообмена в области релаксации течения и при  $Re_H = 31500$  и  $\beta = 3,5\%$  (см. рисунок 81 в) наблюдается незначительное возрастание интенсивности теплообмена (менее 10%) в сравнении с однофазным течением при прочих идентичных параметрах. В области рециркуляции потока и в начальном регионе релаксации характерным является слабое влияние газовых пузырьков на теплообмен (до расстояния  $x/H = 10 \div 15$ ) и интенсивность теплообмена практически совпадает с теплообменом однофазного потока. Следовательно, относительно крупные пузыри при больших значениях числа Рейнольдса не проникают в область отрывного течения и в основном проходят через ядро течения и сдвиговый слой смешения. Подобные особенности в распределении теплообмена были экспериментально получены для газокапельных отрывных течений за обратным уступом и численно после внезапного расширения трубы [377]. В работе [378] было показано, что мелкие пузырьки ( $d_n \leq 1,5$  мм) вызывают интенсификацию теплообмена по всей длине зоны рециркуляции, тогда как более крупные – в основном в зоне релаксации течения.

Расположение максимума теплоотдачи находилось в области  $x/H=7\div 10$ . Положение области максимального теплообмена примерно совпадает с точкой присоединения потока. Ранее подобные распределения коэффициента теплообмена были получены в однофазном воздушном [379, 380] и двухфазном газокапельном [381] потоках.

С помощью метода PIV показано, что причиной интенсификации теплообмена в области восстановления потока является более высокий градиент скорости жидкости в пристенной области двухфазного потока в сравнении с однофазным (см. рисунок 82). В отрывной области потока профили скорости жидкости для однофазного и двухфазного течений практически одинаковы. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с расчетами, выполненными в ИТ СО РАН [371, 372].

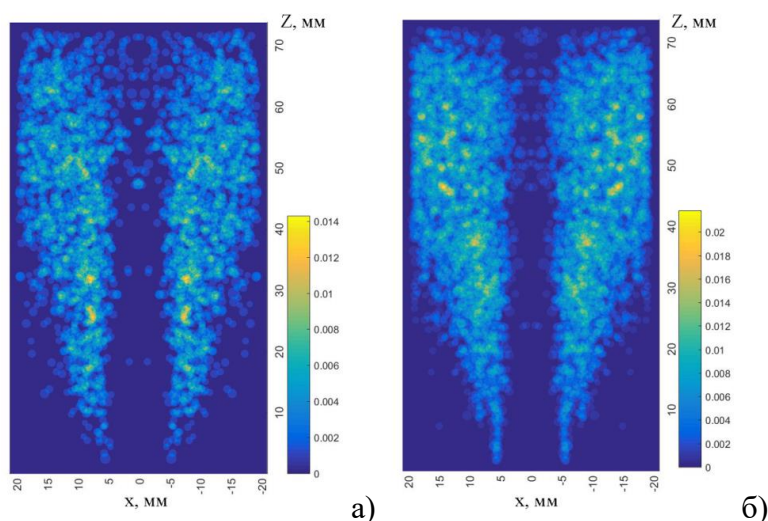


Рисунок 77 – Распределение локального газосодержания за внезапным расширением трубы  $Re_H = 10200$ : а –  $Q_r = 1$  мл/с; б –  $Q_r = 3$  мл/с.

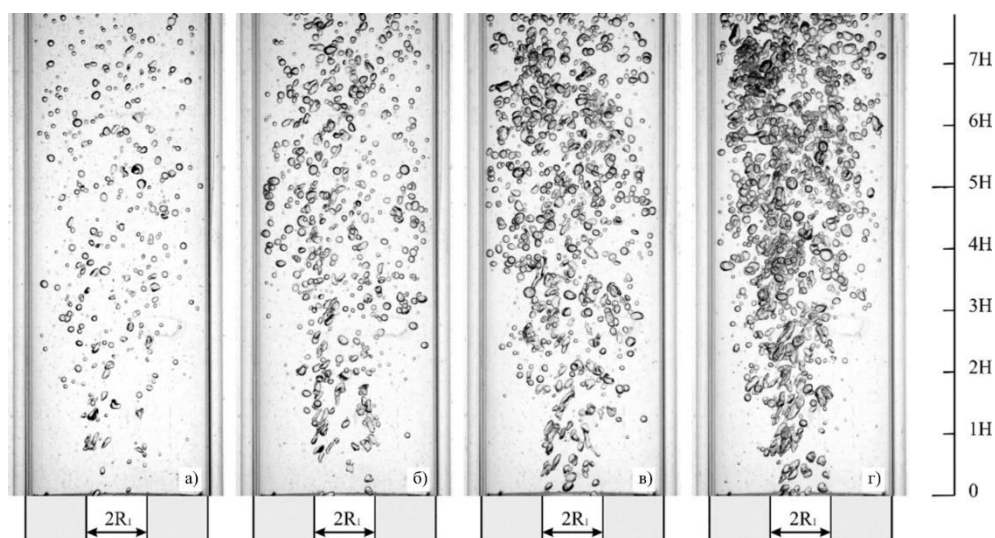


Рисунок 78 – Фотографии потока за внезапным расширением трубы  $Re_H = 20700$ : а –  $Q_r = 1,7$  мл/с; б –  $Q_r = 5$  мл/с; в –  $Q_r = 10$  мл/с; г –  $Q_r = 15$  мл/с.



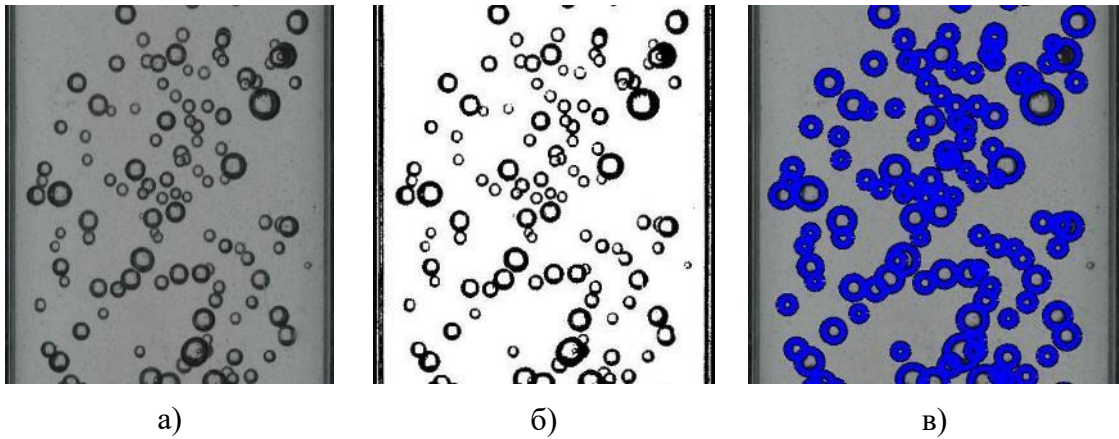


Рисунок 79 – Определение размеров пузырей: а – исходное изображение; б – бинарное изображение; в – исходное изображение с распознанными пузырями.

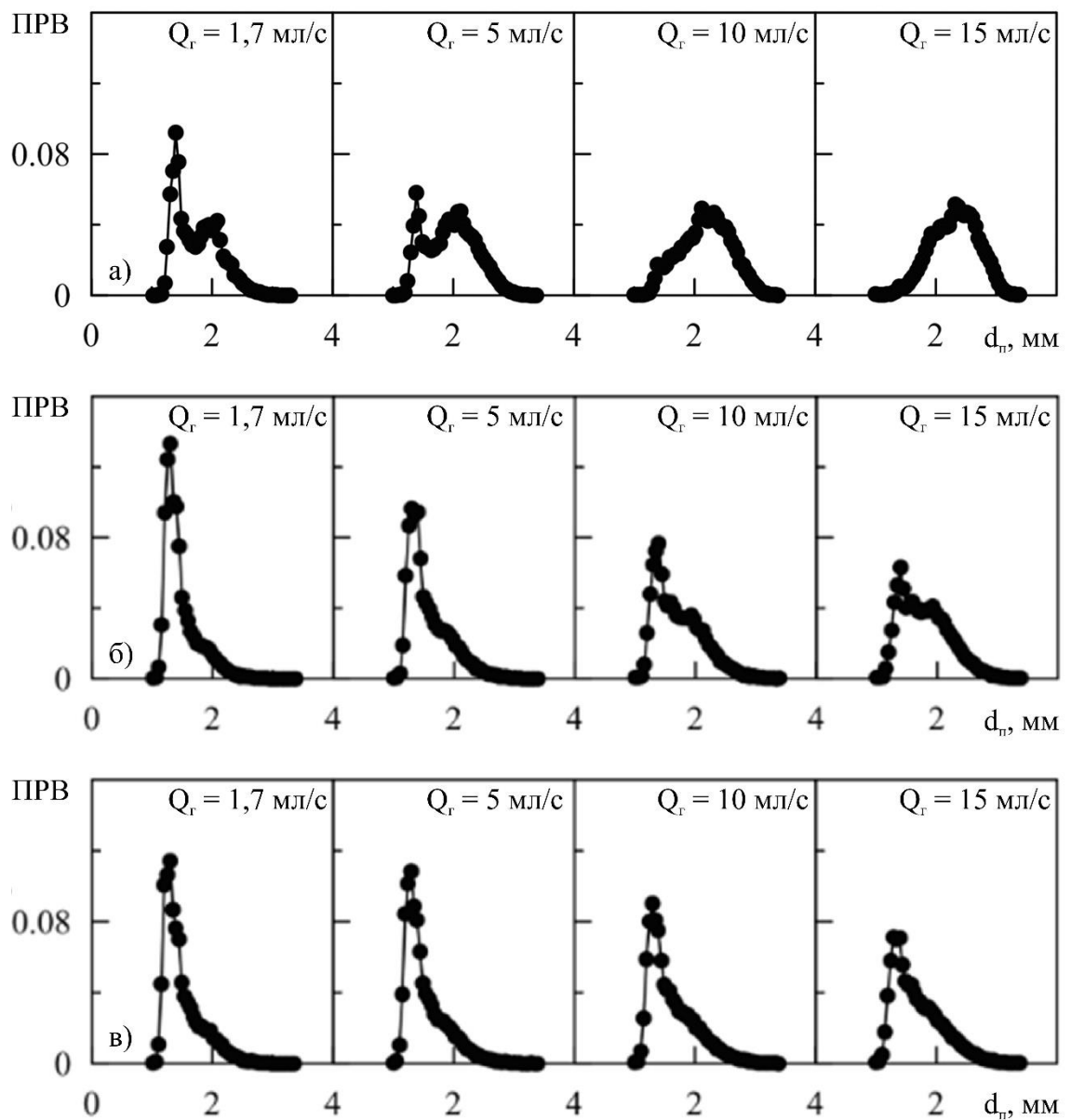


Рисунок 80 – Распределение размеров пузырей в потоке: а –  $Re = 10200$ ; б –  $Re = 20700$ ; в –  $Re = 31500$ .

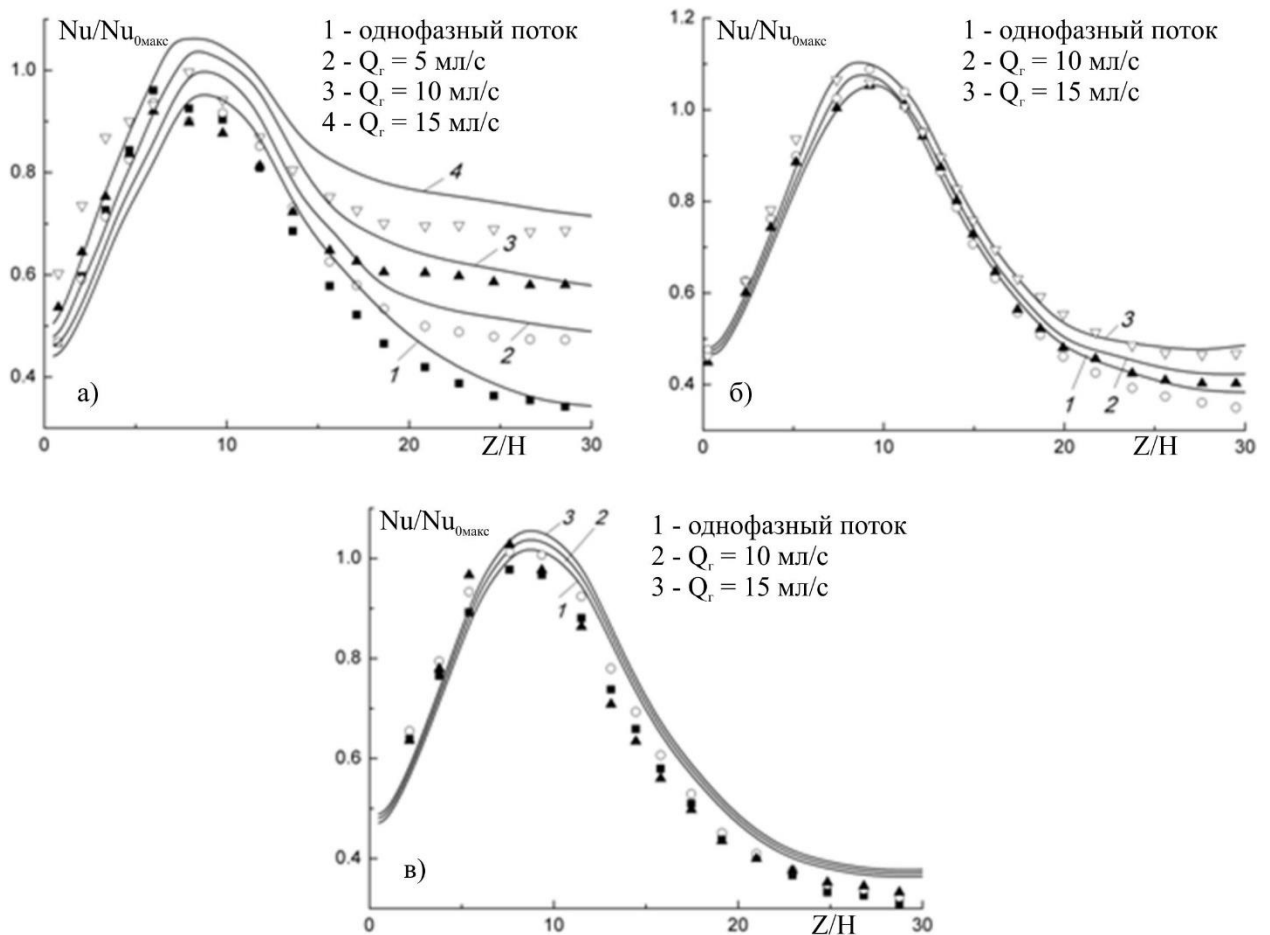


Рисунок 81 – Относительный коэффициент теплообмена за внезапным расширением трубы: а –  $Re = 10200$ ; б –  $Re = 20700$ ; в –  $Re = 30150$ .

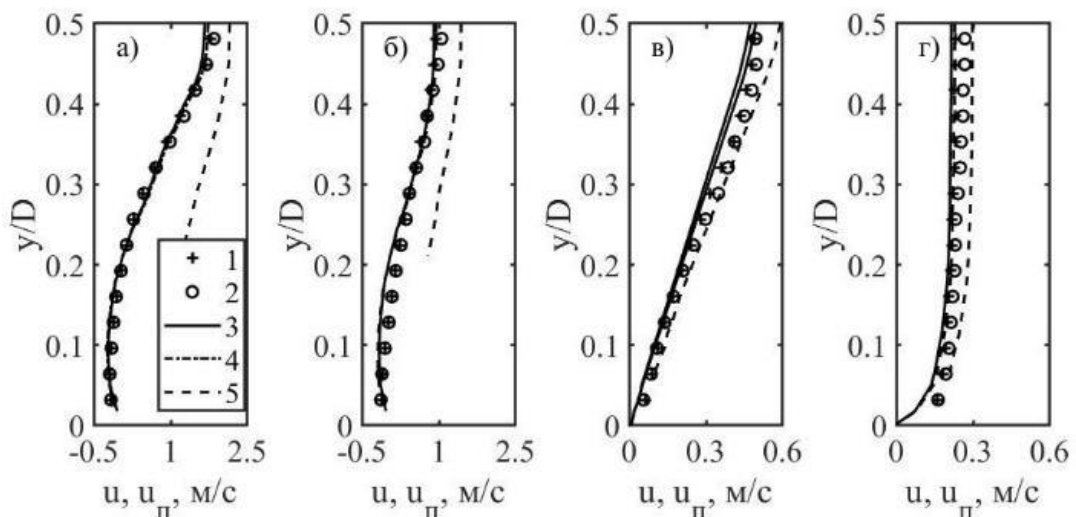


Рисунок 82 – Распределение скорости жидкости и пузырей газа за внезапным расширением трубы при  $Z/H = 4$  (а), 8 (б), 12 (в), 16 (г): 1 –  $u$  при  $\beta = 0$  (эксперимент); 2 –  $u$  при  $\beta = 0,035$  (эксперимент); 3 –  $u$  при  $\beta = 0$  (расчет); 4 –  $u$  при  $\beta = 0,035$  (расчет); 5 –  $u_{\text{п}}$  при  $\beta = 0,035$  (расчет).



### **4.3 Гидродинамика потока в кольцевом канале с частичным перекрытием сечения**

#### **4.3.1 Описание экспериментального стенда для исследования потока с блокадой**

Одним из основных геометрических параметров, оказывающих влияние на теплогидравлику ТВС, является степень затенения потока дистанционирующими элементами. Большинство моделей, описывающих гидродинамику и теплообмен в ТВС основаны на использовании этого параметра. Дистанционирующие решетки имеют сложную геометрическую форму. Для предсказания их влияния на поток требуется верификация на более простых течениях.

В работе [263] выполнено исследование гидродинамики одно- и двухфазного течения в трубе с частично перекрытым сечением. Получены данные о скоростях движения фаз и распределении локального газосодержания. На основе полученных данных проведена верификация моделей вычислительной гидродинамики. Таким образом, исследование гидродинамической структуры пространственно сложных отрывных потоков является актуальной задачей с точки зрения создания эталонных баз данных.

Кольцевой канал является простейшей физической моделью течения в системе стержней (ТВС) [382, 383]. Объектом исследования было течение в осесимметричном кольцевом канале при создании возмущений, которые провоцируют значительные изменения структуры течения, в частности, турбулентных характеристик, локального теплообмена. Возмущение потока в кольцевом канале было создано путем частичного перекрытия поперечного сечения. Такая геометрия позволяет получить поток со строго выраженной крупномасштабной трехмерной структурой, что вызвано перестроением линий тока жидкости при обтекании преграды.

Рабочим участком являлась вертикальная труба из оргстекла с внутренним диаметром  $D_{\text{нар}} = 42$  мм и длиной 3600 мм. По оси трубы установлена внутренняя металлическая труба с наружным диаметром  $D_{\text{вн}} = 20$  мм. Гидравлический диаметр кольцевого канала  $D_r = 22$  мм. В рабочем участке реализуется восходящее течение жидкости. В кольцевом канале установлена преграда – пластина высотой 2 мм, перекрывающая четверть поперечного сечения кольцевого канала (см. рисунок 83 а). Преграда находится на расстоянии  $L = 2700$  мм от входа в рабочий участок. Для центрирования трубы в канале выше преграды по потоку располагались центрирующие решетки [384].

Эксперименты проводились при расходной скорости жидкости 0,45 м/с, число Рейнольдса, рассчитанное по эквивалентному диаметру канала, равно 11000. Внутренняя труба закреплялась на координатном устройстве, при помощи которого производилось ее перемещение вдоль вертикальной оси канала и вращение. В результате можно было менять положение датчиков измерения трения относительно преграды ( $Z$ ), что позволяло проводить исследование поля течения как по продольной, так и по азимутальной координатам.

Дополнительно выполнены исследования с помощью оптических методов (PIV, ЛДИС). На поверхность внешней трубы был закреплен бокс, заполненный иммерсионной жидкостью для снижения оптических искажений. В этой серии экспериментов преграда была закреплена на центральном стержне кольцевого канала и могла перемещаться по вертикальной и азимутальной координатам при перемещении центральной трубки. Это позволяло производить измерения скорости при постоянной позиции и настройке измерительных приборов. Были использованы разработанные в ИТ СО РАН системы «Полис-PIV» и «ЛАД-0х».

#### **4.3.2 Локальная гидродинамика потока с блокадой**

Получены азимутальные распределения напряжения трения и его пульсаций (см. рисунок 83). В непосредственной близости от перегородки наблюдается сложная структура сигнала датчиков трения, содержащая выраженный минимум в затененной области сечения канала и два максимума, расположенных по краям этой зоны (см. рисунок 83 б). При увеличении  $Z$  наблюдается выравнивание сигнала датчика, однако слабое влияние перегородки заметно на расстоянии свыше 600 мм. Распределение турбулентных пульсаций напряжения трения на стенке трубы непосредственно за преградой характеризуется резким возрастанием в затененной области и небольшим снижением в свободном сечении канала (см. рисунок 83 в). При  $Z$  более 400 мм от преграды измеренные значения интенсивности турбулентных пульсаций потока соответствуют таковым при турбулентном течении невозмущенной жидкости.

Поля скорости жидкости за преградой приведены на рисунке 84. Наблюдается качественное соответствие результатов, полученных в предыдущей главе, посвященной исследованию структуры отрывного потока и данных, полученных в более сложной геометрии. Непосредственно за преградой находится отрывная область течения. Об этом говорят отрицательные значения скорости жидкости. По краям от преграды наблюдается существенное повышение скорости потока в сравнении с невозмущенным течением. Наблюдается хорошее соответствие данных, полученных с помощью разных PIV и ЛДА (см. рисунок 85). Отклонение не превышает 5%.

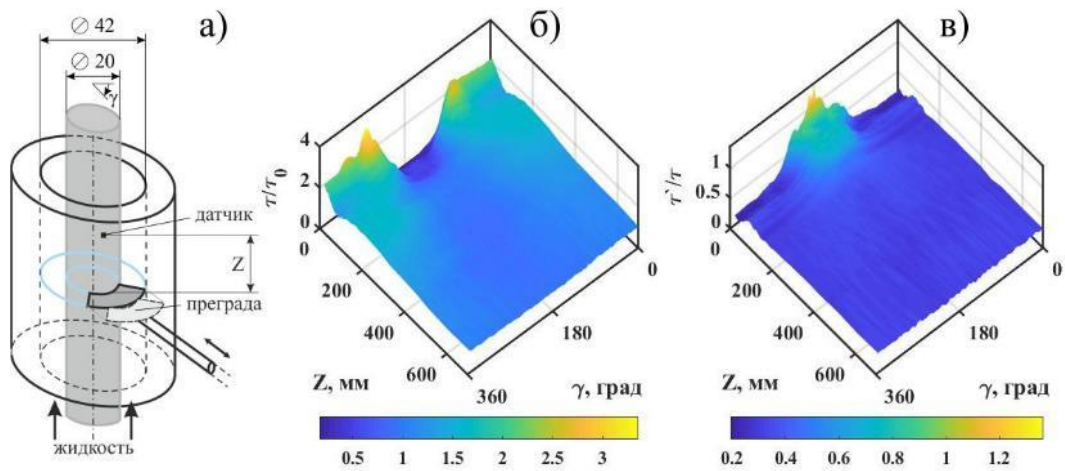


Рисунок 83 – Схема проведения эксперимента (а), поля напряжения трения на стенке (б) и его относительных пульсаций (в) в кольцевом канале с частичным затенением сечения.

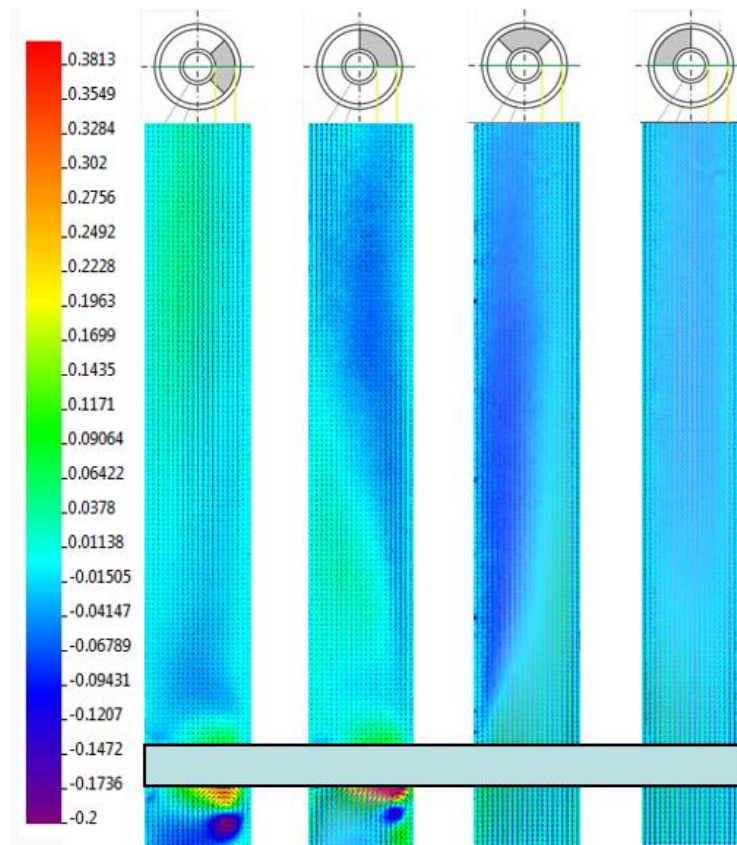


Рисунок 84 – Поля распределения скорости жидкости.

Были получены базы экспериментальных данных, содержащих информацию о полях осредненного и пульсационного напряжения трения на стенке и распределения скорости жидкости в трехмерном течении за преградой. Полученные данные были использованы в качестве эталонных для проведения слепого тестирования в ИБРАЭ РАН (код CONV-3D) и Аргонской Национальной Лаборатории, США (NEK 5000). Исследования были проведены в

рамках Российско-Американского сотрудничества в области гражданской ядерной энергетики [299], разработчиками кодов было получено хорошее соответствие с экспериментальными данными, полученными в рамках данного исследования.

При взаимодействии двухфазного потока ( $\beta = 0,1$ ) с преградой непосредственно за областью блокировки обнаружено повышение газосодержания (см. рисунок 86 а) и его неравномерное распределение в сечении канала. Ниже преграды по потоку наблюдается перестроение структуры двухфазного течения и переход от параболических профилей газосодержания (см. рисунок 86 а) к седлообразным (см. рисунок 86 б). Изучение подобных эффектов важно для верификации кодов MCFD.

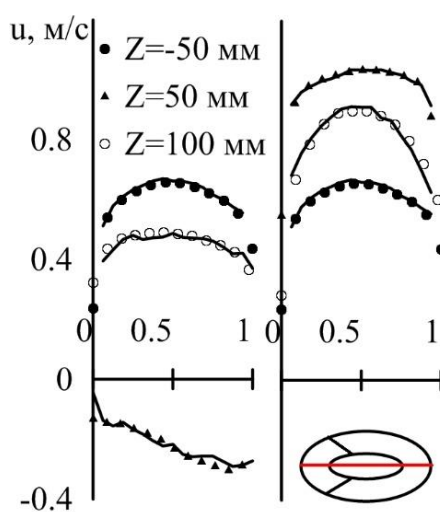


Рисунок 85 – Распределение скорости жидкости за преградой: точки – ЛДИС, линии – PIV.

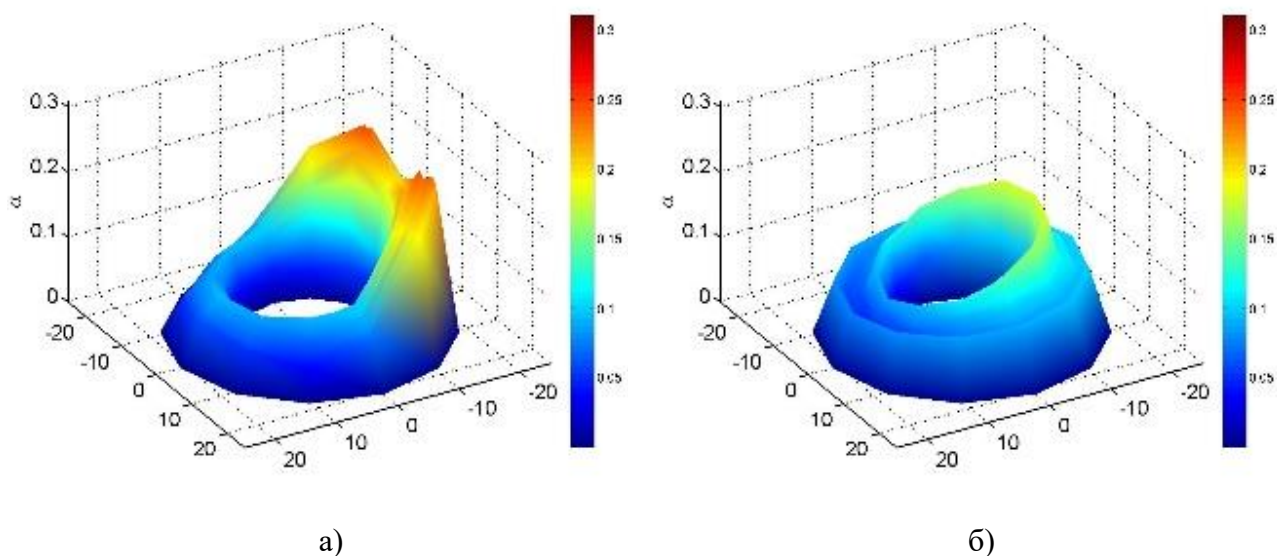


Рисунок 86 – Распределение локального газосодержания в кольцевом канале с преградой: а –  $Z = 100$  мм; б –  $Z = 300$  мм.

## **4.4 Исследование процессов при инъекции дисперсной фазы в тяжелый жидкометаллический теплоноситель**

### **4.4.1 Описание экспериментальных стендов**

В рабочем участке с внутренним диаметром 68 мм производилось исследование процессов формирования пузырей и скорости их движения в расплаве ТЖМТ с помощью резистивного метода (см. рисунок 87). Стенд оснащен системами подвода газа, измерений частоты генерации пузырей и сдвоенного игольчатого датчика электропроводности. Для поддержания температуры рабочего участка он был помещен в теплоизолированный корпус размерами 1000×400×400 мм. Постоянная температура в корпусе обеспечивалась за счет нагнетания горячего воздуха. Рабочий газ – аргон, исследуемый ТЖМТ – сплав Розе следующего состава: висмут 50 %; свинец 25 %, олово 25 %. Температура плавления данного сплава 367 К (94 °С). Температура газа на входе в рабочий участок – 25°С, температура расплава – 135°С.

Для измерения температуры расплава и ключевых элементов установки использовались термопары (тип К). Всего использовалось десять каналов измерения температуры.

При начале экспериментов производился разогрев элементов установки до температуры 135°С. В печи, расположенной выше уровня верхнего торца рабочего участка, производился разогрев необходимого количества расплава выше температуры плавления. При достижении требуемой температуры открывался запорный вентиль, и расплав самотеком заливался в рабочий участок до требуемого уровня. Экспериментальное исследование проводилось при высоте столба жидкости  $H=600$  мм. После заполнения рабочего участка и выдержки по времени около 5 минут, необходимой для стабилизации теплофизических параметров, начинались эксперименты. Газ с помощью контроллера расхода производства Bronkhorst подавался в трубку внешним диаметром 4 мм и внутренним диаметром 3 мм. Расход газа варьировался в пределах от 10 до 1000 мл/мин.

Экспериментальная модель для визуализации движения пузырей в расплаве ТЖМТ представляла собой вертикальную колбу из кварцевого стекла (см. рисунок 88). Внешний диаметр колбы 40 мм, толщина стенок 4,5 мм. Длина рабочего участка 300 мм. По центру колбы помещался нагреваемый элемент диаметром 10 мм, внешняя стенка которого была выполнена из нержавеющей стали. Для позиционирования стержня были использованы трехлепестковые дистанционирующие решетки. Высота решеток 10 мм, толщина материала 0,3 мм. К нагревательному элементу была присоединена трубка с внутренним диаметром 3 мм и внешним диаметром 5 мм. Нагрев центрального стержня производился за счет регулируемого

лабораторного источника напряжения ЛАТР 2000. Для проведения экспериментов устанавливалось достаточное напряжение для компенсации теплообмена с внешней средой и поддержания температуры ТЖМТ на необходимом уровне.

Для предотвращения тепловой стратификации производилось перемешивание ТЖМТ за счет прокачки через него небольшого количества аргона. Отличия в показаниях температуры на разных высотах столба жидкости не наблюдалось.

Аргон с температурой 20 °С прокачивался через трубку. Жидкости (спирт, вода) подавались с помощью предварительно проградуированного перистальтического насоса. Колба заполнялась тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (свинец и эвтектический сплав свинец-висмут). При прохождении жидкости через трубку и объем теплоносителя происходило ее закипание и формирование паровых пузырей. Подходящие близко к стенке пузыри хорошо различимы за счет особенностей смачивания расплавом металла кварцевого стекла. Также можно производить визуализацию всплытия пузырей на свободную поверхность ТЖМТ. В процессе эксперимента производилась непрерывная регистрация температуры расплава с помощью термопары. Использовалась термопара хромель-алюмель (тип К). Термопара была подключена к измерителю-регулятору температуры ОВЕН ТРМ-138. Система измерения температуры была предварительно проградуирована.

Изучение теплообмена между ТЖМТ и дисперсной газовой фазой производилось в специально созданном экспериментальном стенде. Для термической изоляции рабочего участка (см. рисунок 89) была применена вакуумная изоляция. Рабочий участок - тонкостенная трубка с толщиной стенки 1 мм и внутренним диаметром 48 мм помещался внутри трубы из нержавеющей стали с толщиной стенки 2 мм и внешним диаметром 82 мм. К обеим трубам было приварено дно толщиной 2 мм. В верхней части герметизация выполнялась за счет уплотнительной резины, зажатой между фланцами. Производился нагрев внешней стенки рабочего участка. Вокруг трубы был намотан ленточный нагреватель длиной 10 м и номинальной мощностью 2 кВт (см. рисунок 89). Вокруг нагревателя была организована теплоизоляция с помощью асбестового шнура диаметром 10 мм, намотанного в два слоя. Сверху теплоизоляция выполнялась за счет высокотемпературного теплоизолирующего материала, используемого для утепления двигателей автомобилей (муллитокремнеземная вата, кремнеземная ткань, стекловолоконные нити). Управление мощностью нагрева осуществлялось за счет лабораторного источника питания ЛАТР 2000.

Во время проведения экспериментов производилась непрерывная откачка газа из зазора между трубами с помощью форвакуумного насоса (разрежение до  $10^{-4}$  атмосфер). Измерение

расхода аргона производилось с помощью расходомерной диафрагмы. Расход газа во время проведения экспериментов был 120, 180, 206, 240 мл/с. Предварительно была проведена калибровка газовой линии с помощью барабанного расходомера и поиск течей в подводящем тракте газовой системы.

После заливки в рабочий участок расплава свинца мощность нагрева подбиралась таким образом, чтобы в расплаве установилась постоянная температура  $420^{\circ}\text{C}$ . В экспериментах мощность нагрева была 700 Вт. Для измерения температуры использовалась термопара (тип К). Спай термопары находился в трубке из нержавеющей стали с внутренним и внешним диаметрами 2 и 4 мм.

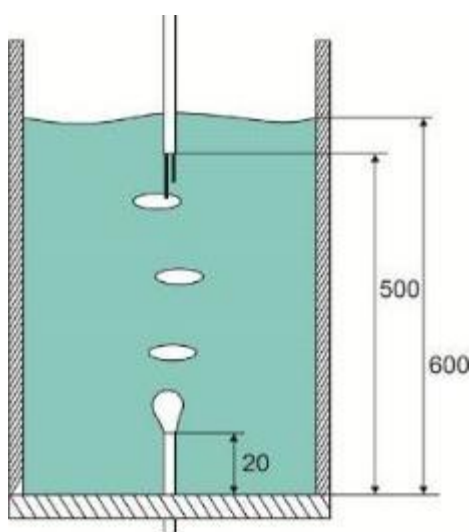


Рисунок 87 – Схема установки для исследования генерации и движения пузырей в расплаве ТЖМТ.

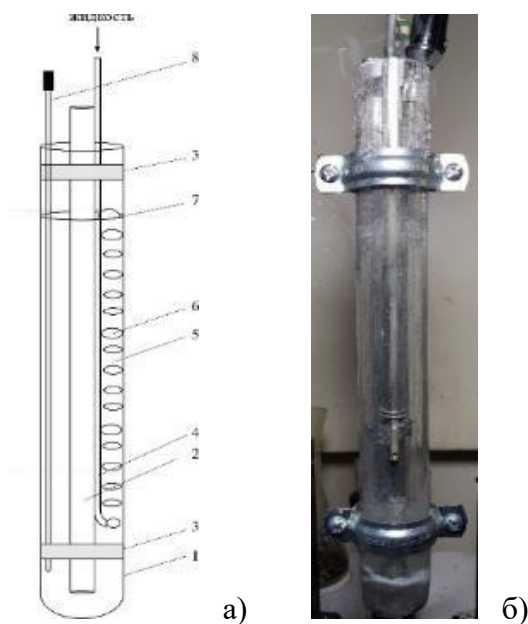


Рисунок 88 – Рабочий участок для визуализации течения при попадании воды и водяного пара в ТЖМТ: а – схема рабочего участка; б – фотография рабочего участка.



Рисунок 89 – Фотография экспериментального стенда для исследования процессов захлаживания расплава ТЖМТ при взаимодействии с инертным газом (рабочий участок с вакуумной теплоизоляцией).

#### 4.4.2 Описание методов и неопределенности измерений

В ходе экспериментов по исследованию взаимодействия газовой фазы с расплавом теплоносителя проведены измерения:

- частоты генерации газовых пузырей при их отрыве от отверстия истечения;
- локального газосодержания;
- размера пузырей;
- скорости пузырей в объеме жидкости;
- температуры расплава.

Нижний торец датчика электропроводности располагался по оси канала диаметром 68 мм на расстоянии 500 мм от его дна. Датчик представлял собой две проволоки диаметром 0,125 мм, облаченные в тефлоновую изоляцию. Торцы датчиков были заточены для упрощения



накалывания пузырей. Расстояние по вертикали между торцами датчиков составляло 2,2 мм. Зная промежуток времени между взаимодействием пузырей с электродами и данное расстояние можно определить скорость движения пузырей. По времени между прохождением верхней кромки пузыря (размыкание электрической цепи) и нижней кромки пузыря (замыкание электрической цепи) определялись локальное газосодержание и размер пузырей.

Одновременно производилась регистрации частоты образования пузырей. Положительный электрод источника питания был подключен к тонкому датчику, находящемуся непосредственно в трубке, через которую подавался газ (см. рисунок 90). При образовании пузыря возникает шейка пузыря, соединяющая пузырь с кромкой отверстия истечения. При увеличении пузырька сила плавучести превышает силу поверхностного натяжения, происходит отрыв пузыря и шейка пузыря разрушается. Образующийся пузырек всплывает вверх, а связанный с остатком шейки пузыря газ возвращается в отверстие истечения, после чего начинается формирование следующего пузыря.

Неопределённость измерения частоты формирования пузырей определяется частотной характеристикой измерительной системы, возможностью не учета мелких пузырей и крупных пузырей при большом расходе газа. В исследованных режимах неопределенность измерения отрывной частоты составляет не более  $\pm 5\%$

Неопределенность измерения локального газосодержания с помощью игольчатого датчика была исследована в ряде работ. В частности, в работе [385] показано, что она находится в пределах 5-10% для оптического датчика и порядка 7-15% для датчика электропроводности. Таким образом, можно считать, что неопределенность измерения локального газосодержания не превышает 15%.

Неопределенность определения размера пузырей по линии следования вдоль движения по оси измерительного датчика определяется несколькими факторами:

- при взаимодействии межфазной границы с измерительным датчиком может происходить втягивание границы в полость пузыря, что приводит к ошибочной оценке его длины, что частично компенсируется за счет подобного процесса на нижней кромке пузыря;
- пузырь накаливается не по оси, и производится измерение его хорды;
- возможно касание пузырем датчика.

В целом погрешность измерения хорды пузыря приблизительно соответствует погрешности измерения локального газосодержания и не превышает 20%. Неопределенность измерения скорости пузырей с помощью сдвоенного датчика проводимости не превышает 15%.

Поскольку температура жидкости в потоке измерялась термопарой, работающей в дифференциальном режиме, погрешность смещения нулевого показания исключалась. Общая неопределенность измерения определялась чувствительностью регистрирующей аппаратуры и составляла в стационарных условиях  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

Рассмотрим отрыв пузыря от отверстия при расходе газа 50 мл/с (см. рисунок 91). Формирование пузыря начинается сразу после отрыва предыдущего пузыря. На кромке отверстия истечения формируется полусферический зародыш пузыря. С течением времени газ поступает в пузырь и его объем увеличивается. При достижении пузырем достаточного объема, при котором сила плавучести превысит силу поверхностного натяжения, начинается процесс отрыва пузыря. Газ продолжает поступать в полость пузырька, увеличивая его объем через тонкую шейку. Затем происходит отрыв пузыря и шейка разрушается.

Необходимо отметить, что финальная стадия отрыва пузырька происходит не от поверхности отверстия истечения, а от измерительного электрода. Были проведены исследования в объеме воды и показано, что наличие тонкого капилляра не оказывает существенного влияния на процесс формирования газовых пузырей в выбранном в данной работе диапазоне расходов газа. При других расходах газа можно рекомендовать нанесение проводящего покрытия непосредственно на стенки капилляра истечения.

При большем расходе газа в начальной стадии формирования пузырька на поверхности отверстия истечения формируется полусферический зародыш пузыря, который увеличивается с течением времени (см. рисунок 92). Как и в предыдущем случае, при разрушении шейки пузыря наблюдается обнажение электрода и происходит замыкание электрической цепи. При формировании пузырей в этом режиме также наблюдается существенная деформация пузыря после отрыва.

При расходе газа 800 мл/мин отрыв пузыря происходит похожим образом, однако в объеме жидкости наблюдается взаимодействие нового пузыря с предыдущим пузырем (см. рисунок 93). До возможного слияния пузыри имеют форму, похожую на гриб. Подобный режим генерации пузырей ранее был описан в литературе.

Возможно использование схемы измерения отрывной частоты пузырей (см. рисунок 94), однако требуется тонкая настройка положения покрытого изоляцией капилляра относительно диэлектрической вставки.

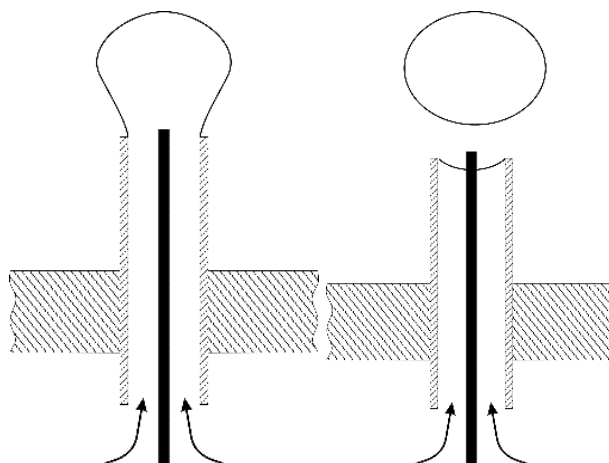


Рисунок 90 – Измерение генерации пузырей с помощью датчика, вмонтированного в трубку.

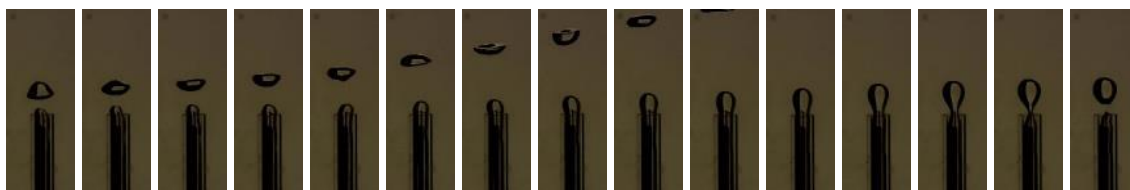


Рисунок 91 – Пример формирования пузыря вблизи кромки капилляра  $Q_r=50$  мл/мин.

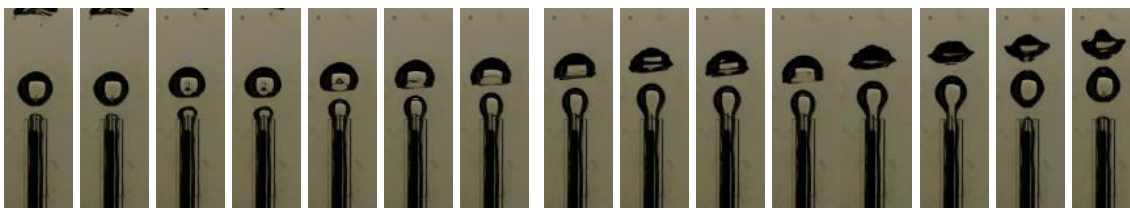


Рисунок 92 – Пример формирования пузыря вблизи кромки капилляра  $Q_r=300$  мл/мин.

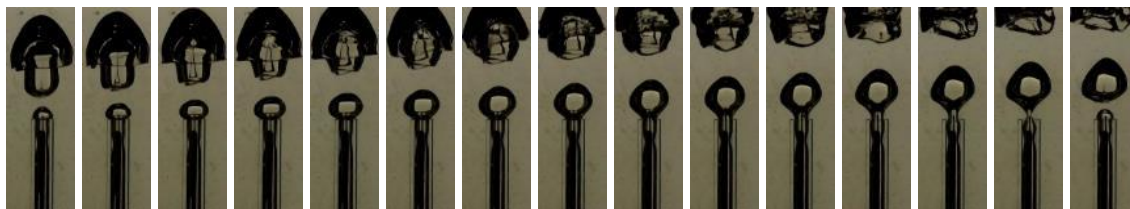


Рисунок 93 – Пример формирования пузыря вблизи кромки капилляра  $Q_r=800$  мл/мин.

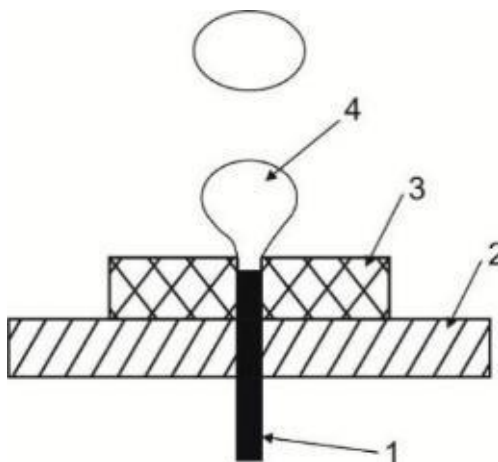


Рисунок 94 – Измерение генерации пузырей с помощью капилляра – датчика: 1 – капилляр; 2 – дно рабочего участка; 3 – диэлектрическая вставка; 4 – пузырек.

### 4.4.3 Результаты экспериментов

Результаты измерений отрывной частоты пузырей в ТЖМТ приведены на рисунках 95-97. На рисунке 95 приведены значения напряжения в измерительной ячейке. При значении  $U_d = 0$  пузырь закрывает измерительный электрод, и электрическая цепь разомкнута. При отрыве пузыря цепь является замкнутой и напряжение скачкообразно возрастает. С увеличением  $Q_r$  наблюдается уменьшение времен, соответствующих замкнутой и разомкнутой цепи. Это связано с увеличением частоты генерации пузырей при увеличении  $Q_r$  и более длительным временем заполнения полости пузыря при малых  $Q_r$ . Такая же тенденция отмечена при визуализации отрыва пузырей в воде.

Графики частотной характеристики полученных сигналов приведены на рисунке 96. При малых  $Q_r$  заметен ярко выделенный пик частоты, который соответствует отрывной частоте пузырей. При увеличении  $Q_r$  происходит размытие частоты, поэтому размеры пузырей в таких режимах определялись с помощью метода градиентов. По отрывной частоте можно произвести оценку отрывного диаметра пузырей (см. рисунок 97). Приведены осредненные данные для трех экспериментов, выполненных при одинаковых параметрах установки в разные дни. Отклонение не превышало  $\pm 5\%$ . Для сравнения на рисунке приведены данные, рассчитанные по модели, предложенной в [386]. С помощью предложенной модели получено удовлетворительное описание результатов экспериментов. Средняя скорость всплытия пузырей в расплаве была около 0,35 м/с.

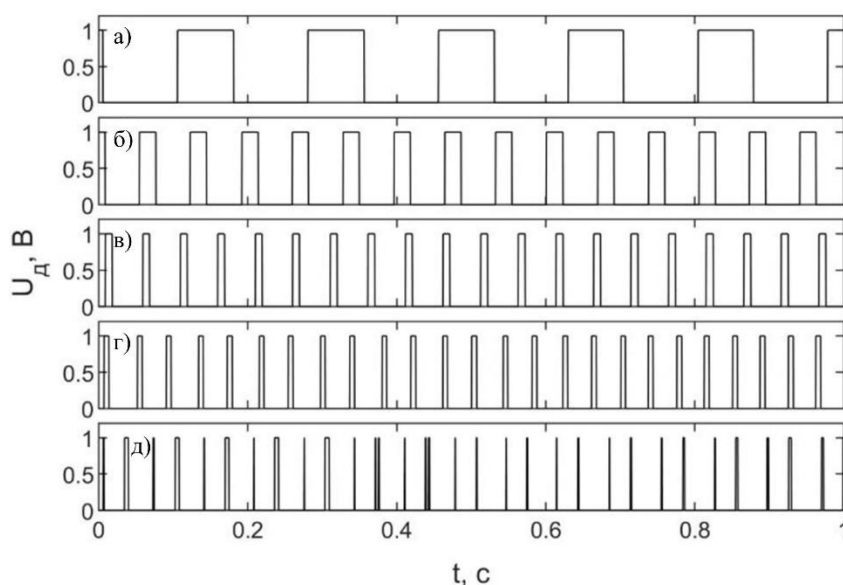


Рисунок 95 – Сигналы датчика определения частоты отрыва пузырей: а –  $Q_r = 50$  мл/мин; б –  $Q_r = 150$  мл/мин; в –  $Q_r = 300$  мл/мин; г –  $Q_r = 500$  мл/мин; д –  $Q_r = 800$  мл/мин.

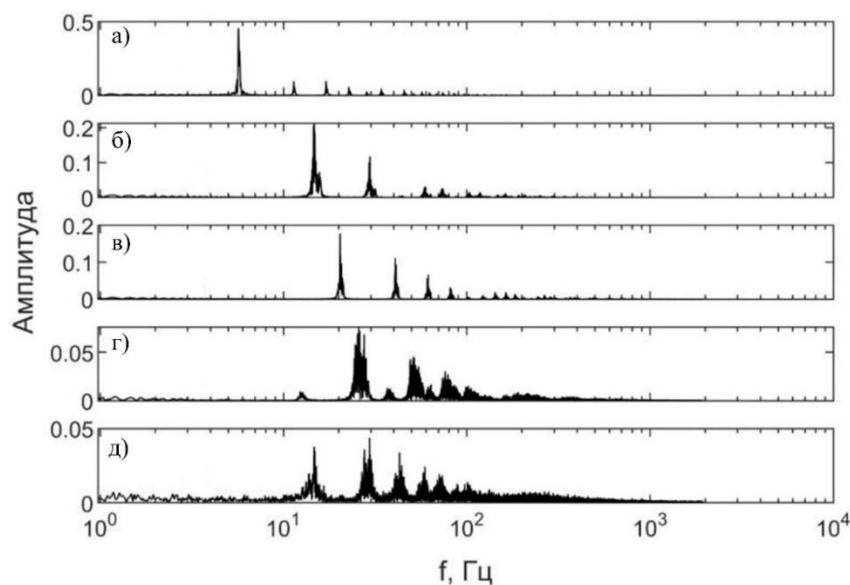


Рисунок 96 – Амплитудно-частотная характеристика датчика: а –  $Q_r = 50$  мл/мин; б –  $Q_r = 150$  мл/мин; в –  $Q_r = 300$  мл/мин; г –  $Q_r = 500$  мл/мин; д –  $Q_r = 800$  мл/мин.

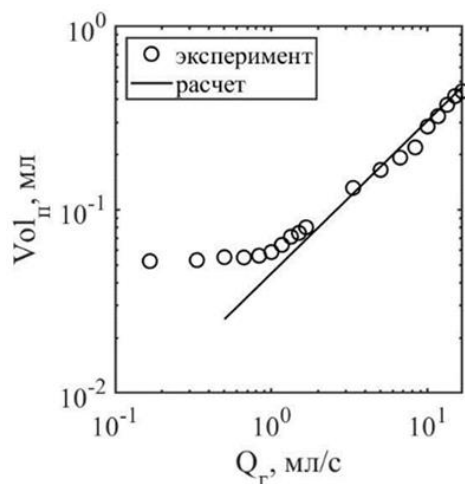


Рисунок 97 – Отрывной объем пузыря в зависимости от расхода газа.

#### 4.4.4 Эксперименты с визуализацией движения пузырей в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе

Проведено исследование взаимодействия паров этилового спирта с эвтектическим сплавом свинец-висмут. Эксперименты проведены на установке (см. рисунок 88). После заливки сплава в рабочий участок выставлялась необходимая мощность для поддержания температуры  $225\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Масса сплава в данной серии экспериментов  $1380\text{ г}$ . Мощность нагревателя при этом составляла  $74\text{ Вт}$ . После установления равновесной температуры задавался расход спирта  $0,115\text{ мл/с}$  и начиналась видеосъемка процесса. При прохождении пузырей вблизи стенок канала их можно четко визуализировать и определять скорость их движения. Примеры последовательности

кадров при движении малого, среднего и относительно крупного пузырей показана на рисунках 98 а-в. Задержка между кадрами составляла  $1/60$  с. Наблюдаемые пузыри являются сильно деформированными, их размеры отличаются. Наблюдалось практически линейное падение температуры расплава.

При исследовании взаимодействия воды и водяного пара с жидким свинцом также появлялась возможность производить визуализацию процесса движения пузырей. После заливки свинца в рабочий участок выставлялась необходимая мощность для поддержания температуры  $385\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Масса свинца в эксперименте  $1300\text{ г}$ . Мощность нагревателя, необходимая для поддержания температуры составляла  $190\text{ Вт}$ . С помощью перистальтического насоса задавался необходимый расход воды и стартовала видеосъемка. При контакте воды со свинцом происходит взрывное парообразование, сопровождающееся выбросом крупных фрагментов жидкого свинца за пределы рабочего участка. Последовательность кадров при взрывообразном вскипании в объеме свинца приведена на рисунке 99. Начальная и конечная масса во время эксперимента различается. По остаточному уровню свинца установлено, что потери не превысили  $10\div 15\%$  от начальной массы.

При парообразовании, происходившем при вводе жидкости в ТЖМТ, размеры пузырей трудно контролировать. Для изучения характеристик движения пузырей в жидком металле производилось исследование движения пузырей аргона в эвтектическом сплаве свинец-висмут. Плотность распределения вероятности (ПРВ) для скорости всплытия пузырей показана на рисунке 100. Полученные данные приведены для пузырей, подходящих к стенке. При этом большая часть пузырей невидима и пузыри могут двигаться в цепочках, что может приводить к существенному увеличению их скорости. Видимые размеры пузырей находились в пределах  $4$  до  $12\text{ мм}$  по максимальной координате. Средняя скорость движения пузырей около  $0,4\text{ м/с}$ . Указанный результат соответствует недавно полученным в литературе данным [159, 160], и результатам данной работы, полученным с помощью датчика сопротивления.

В рабочем участке диаметром  $48\text{ мм}$  проведено исследование темпа захолаживания ТЖМТ при прокачке инертного газа. В качестве рабочей жидкости использовался расплав свинца марки ОС2. Высота уровня расплава –  $400\text{ мм}$ . Температура расплава в рабочем участке  $410 - 420\text{ }^{\circ}\text{C}$ , аргон подавался в участок при комнатной температуре. Расход газа во время проведения экспериментов был  $120, 180, 206, 240\text{ мл/мин}$ .

Полученные данные были использованы для верификации системного теплогидравлического кода HYDRA/IBRAE/LM [387–389]. Результаты для темпа захолаживания и локального газосодержания приведены на рисунках 101 а,б. Локальное газосодержание было

определено с помощью резистивного датчика сопротивления. Он был расположен на расстоянии 330 мм от дна. Дополнительно были проведены исследования уровня поверхности расплава с помощью поплавкового датчика. Оцененное с помощью этих методов газосодержание совпадает с точностью около 5%. Получено хорошее совпадение между экспериментальными и расчетными данными. Сходимость данных увеличивается с увеличением  $Q_{г.}$

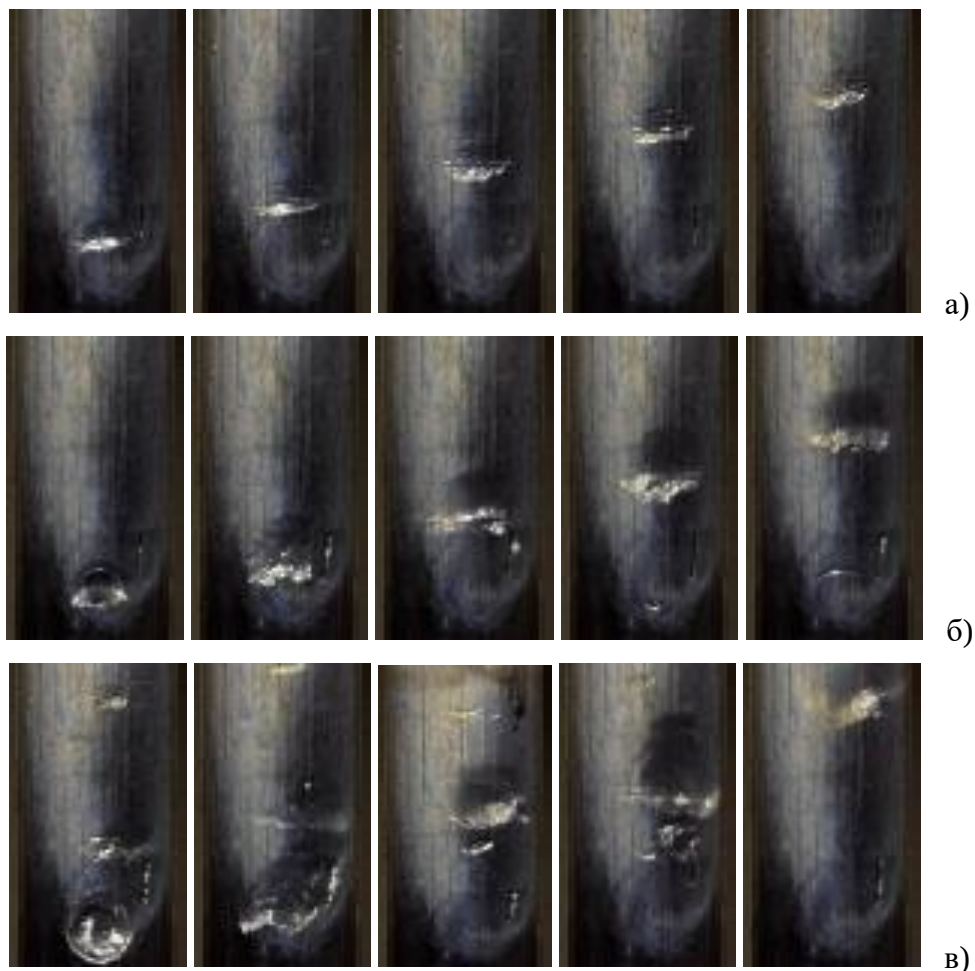


Рисунок 98 – Последовательность кадров при движении малого (а), среднего (б) и крупного (в) паровых пузырей в ТЖМТ.

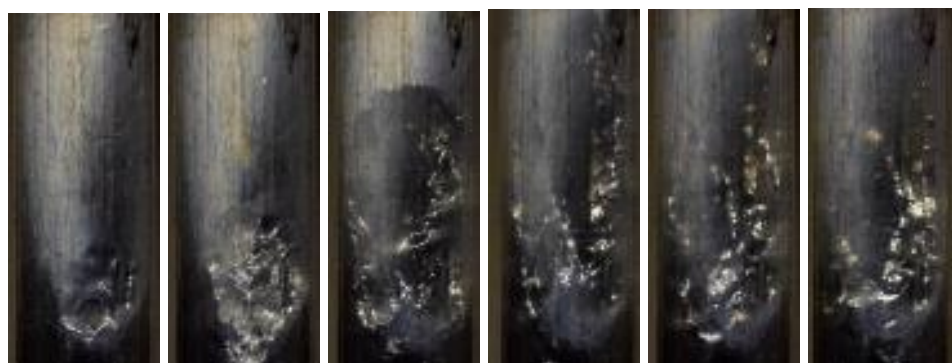


Рисунок 99 – Последовательность кадров при вскипании пароводяной смеси в свинце.

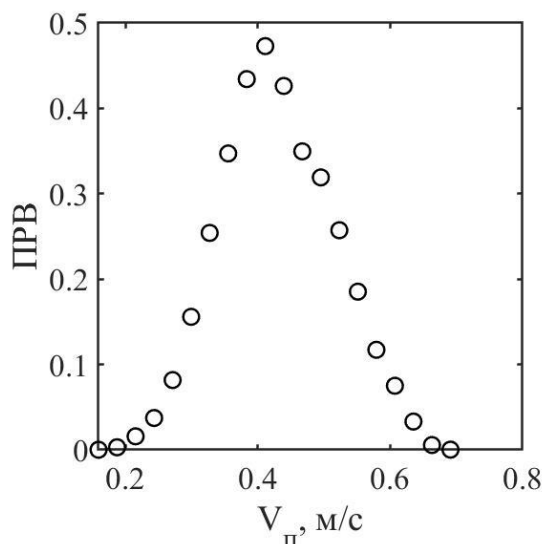


Рисунок 100 – Распределение скорости видимых фрагментов пузырей аргона в эвтектическом сплаве свинец-висмут.

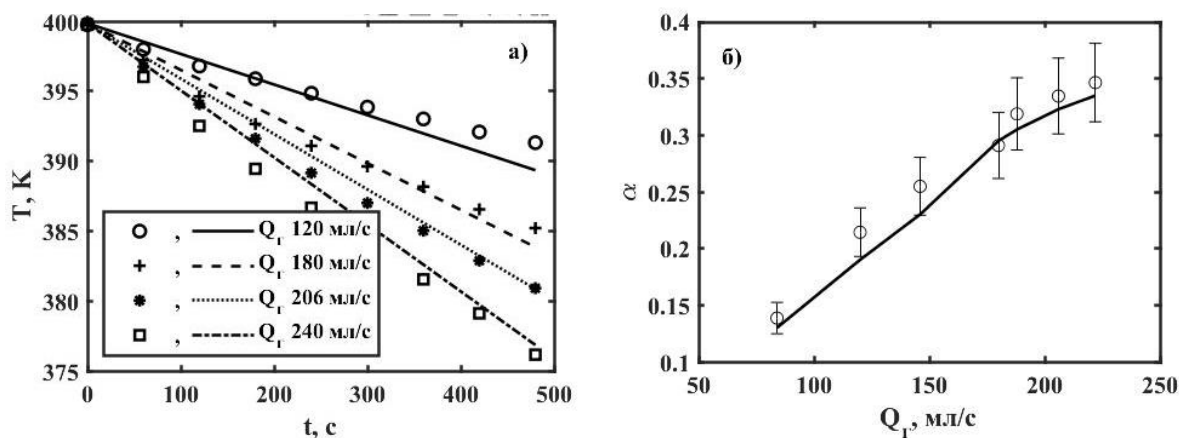


Рисунок 101 – Сравнение данных эксперимента (знаки) и расчета (линии): а – температура захлаживания свинца; б – изменение газосодержания для разных  $Q_g$ .

## 4.5 Динамические процессы, возникающие при импульсной инъекции газа в жидкость

### 4.5.1 Описание экспериментального стенда

Для выполнения эксперимента в воде установка состояла из нижней части, выполненной из дюралюминия и верхней части из стекла, чтобы проводить визуальные наблюдения и видеосъемку [154, 390]. В качестве газа использовался атмосферный воздух, нагнетаемый при помощи компрессора. Давление газа в системе задавалось при помощи прецизионного редуктора производства Camozzi.



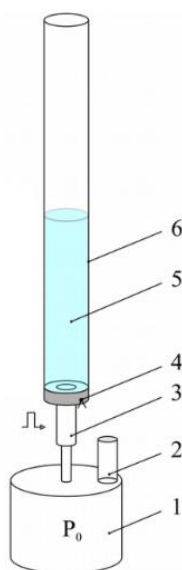


Рисунок 102 – Схема экспериментального стенда: 1 – сосуд; 2 – датчик избыточного давления; 3 – электромагнитный клапан; 4 – термопара; 5 – столб жидкости; вертикальная труба.

В ходе проведения эксперимента производилась запись показаний датчиков давления газа в баллоне и преобразователя давления ЛХ-602. Видеосъемка процесса производилась с кадровой частотой 400 Гц. После релаксации жидкости и выхода газовых пузырей на ее поверхность эксперимент повторялся.

Для эксперимента со сплавом Розе установка представляла собой вертикальную трубу из нержавеющей стали. Рабочий участок был установлен в теплоизолированный объем, в котором производился нагрев путем нагнетания горячего воздуха. Для контроля температуры рабочего участка использовались три термопары типа К. Одна из них была установлена на корпусе датчика давления, еще две - на расстояниях 400 и 700 мм от нижней части установки. Эксперименты проводились при температуре расплава 135 °С. Залив расплава перед проведением экспериментов производился через верхний торец рабочего участка через переливную линию.

Геометрические параметры рабочих участков были подобными. Внутренние диаметры рабочих участков для водяного и ТЖМТ теплоносителей 25 мм. На расстояниях  $z = 60$  были установлены датчики давления ЛХ-602. Длина трубы 1200 мм. Верхний торец трубы был открыт. Газ подавался через штуцер, установленный в центре дна. К нему был подсоединен клапан производства Samozzi, время открытия которого управлялось при помощи программируемого контроллера.

В начале эксперимента происходит открытие электромагнитного клапана (диаметр проходного сечения 2,5 мм) за время около 5 мс. Непосредственно перед клапаном находится

сосуд объемом 1,8 литра, в котором находится газ под постоянным давлением. При открытии клапана «взрывным» образом происходит впрыск газа в расплав. Истечение газа в рабочий участок происходит через нижний торец рабочего участка, соединённого с выходным штуцером клапана трубкой длиной 20 мм и диаметром 6 мм.

Во время экспериментов высота столба жидкости  $H$  изменялась в пределах  $500 \div 1000$  мм, давление в системе подачи газа  $P_0$   $120 \div 200$  кПа, время открытия клапана  $t_{\text{инж}}$  -  $50 \div 125$  мс.

#### **4.5.2 Методы и неопределенности измерений**

Измерение пульсаций давления производилось с использованием пьезоэлектрических датчиков давления, имеющих резонансную частоту 15 кГц. Данные записывались в виде цифрового файла с дискретностью 100 мкс. Сигнал с датчиков давления поступал через высокоомный усилитель на АЦП и затем записывался в цифровом виде. Суммарная неопределенность измерений определялась в результате тарировки, как и чувствительность датчиков. Она не превышала 15% в частотном диапазоне 5 Гц – 15 кГц.

Измерение температуры жидкости в процессе вдува газа/пара в расплав проводилось при помощи малоинерционной термопары. Использовался спай медь-константан. Диаметр проводов термопары 0,12 мм. Неопределенность измерений температуры не более  $\pm 1,5^\circ\text{C}$ .

Изменение свободного уровня определялось регистрацией перемещений малоинерционного поплавка на свободной границе расплава. Неопределенность измерения уровня не более  $\pm 2,5\%$ .

Во время эксперимента непрерывно происходила запись изменения давления в канале и эволюции свободного уровня расплава. Измерения заканчивались по достижении времени выхода газа через свободный уровень.

#### **4.5.3 Эволюция параметров теплоносителя при внезапной инжекции дисперсной фазы**

На рисунках 103 – 106 приведены данные по эволюции параметров стенда для экспериментов с водой в качестве рабочей жидкости. При открытии запорного клапана начинается падение давления в газовой системе из-за выхода газа в объем жидкости. После закрытия клапана падение давления прекращается. Можно провести оценку времени открытия клапана и потери давления (расход) газа во время эксперимента. Процесс ввода газа является определяющим для эволюции давления в объеме жидкости. В период времени между открытием

и закрытием клапана наблюдаются высокочастотные пульсации давления, вызванные распространением ударной волны. В это же время происходит впрыск газа и формирование газовой каверны. При закрытии входного клапана прекращается подача газа, формируется крупный газовый пузырь и начинаются низкочастотные осцилляции объема пузыря с затихающей со временем амплитудой. Увеличение времени открытия клапана приводит к уменьшению максимальной амплитуды колебаний давления и увеличению периода колебаний. Характерное время протекания процесса зависит от времени вдува газа, высоты столба и давления в газовой камере и занимает от 1 до 3,5 секунд.

Из-за вспенивания и расслоения в ходе проведения экспериментов определение динамики свободного уровня жидкости затруднено. Отслеживание колебаний носика пузыря Тейлора было осуществлено с помощью обработки данных видеосъемки, которая была выполнена в автоматическом режиме с помощью оригинального программного обеспечения. Полученные данные приведены на рисунке с помощью линий синего цвета. После открытия клапана наблюдается ряд хорошо заметных осцилляций. После завершения колебательного процесса изменение позиции пузыря связано с его всплытием. При этом скорость движения пузыря хорошо описывается с помощью формулы (1). Оцененное по формуле положение носика пузыря приведено на рисунках (линия 2). Линия 3 показывает скорость начальной динамики фронта. При  $P_0=120$  и  $200$  кПа начальная скорость фронта составляет около 2 и 3 м/с соответственно.

Данные экспериментов с использованием сплава Розе приведены на рисунках 107 – 110. Изменяемыми параметрами являлись время открытия клапана, давление в газовой системе и высота столба жидкости.

В отличие от прозрачной жидкости, в этом случае невозможно оценить динамику газовой фазы непосредственно в канале. Поэтому производилось изучение динамики свободного уровня расплава. Для измерений использовался малоинерционный поплавок, изготовленный из дюралюминия. Вес поплавка был незначителен в сравнении с весом столба модельной жидкости. Для определения положения поплавка производилась видеосъемка с частотой 60 Гц и разрешением 1920x1080. Верхний шток поплавка помещался в колбу из органического стекла. При помощи матового фона и подсветки было реализовано теневое освещение. Была проведена калибровка, позволяющая определить количество пикселей на линейный размер изображения. Полученная информация обрабатывалась в автоматическом режиме. Эксперименты проводились с поплавком и без поплавка для каждого из исследуемых режимов. Отклонений в динамике давления выявлено не было.

Полученные результаты приведены на рисунках в виде синей линии. Впрыск газа оказывает на положение уровня следующее влияние. В начальный период времени клапан ввода аргона открыт и происходит закачка газа в рабочий участок. При этом наблюдается практически линейное увеличение уровня. Затем клапан запирается, происходит формирование газовой каверны и начинается колебательный процесс, связанный с пульсациями пузыря. Через некоторое время после угасания осцилляций уровня происходит выход газового пузыря через свободную поверхность расплава и падение поплавка.

Красными линиями на рисунках приведены данные о зависимости  $P(t)$ . На реализациях давления наблюдается колебательный процесс с характерными частотами от 5 до 10 Гц, в зависимости от исследуемых режимов.

Анализ полученных данных по изменениям давления и свободного уровня жидкости указывает на следующие общие закономерности:

- амплитуда и частота пульсаций давления в канале зависит от начального давления инертного газа, высоты столба жидкости, расхода инертного газа, времени вдува газа, плотности жидкости и соотношения между диаметрами отверстия истечения газа и диаметром канала;
- амплитуда пульсаций давления при внезапном истечении газа в жидкость существенно увеличивается при повышении давления газа при сохранении прочих исходных параметров;
- амплитуда пульсаций давления увеличивается при увеличении плотности жидкости;
- частота пульсаций давления в большей степени определяется соотношением объемов выдвинутого газа и жидкости, с увеличением этого соотношения частота пульсаций увеличивается при прочих равных условиях;
- с увеличением исходного давления газа частота пульсаций также увеличивается при сохранении прочих равных условий;
- колебания свободного уровня жидкости находятся в противофазе с пульсациями давления в канале, при уменьшении давления уровень жидкости поднимается вверх, чем больше амплитуда пульсаций давления, тем выше размах колебаний уровня жидкости;
- частота колебания свободного уровня жидкости соответствует частоте пульсаций давления.

Полученные данные были использованы для настройки теплогидравлического кода HYDRA/IBRAE/LM [154, 391, 392].

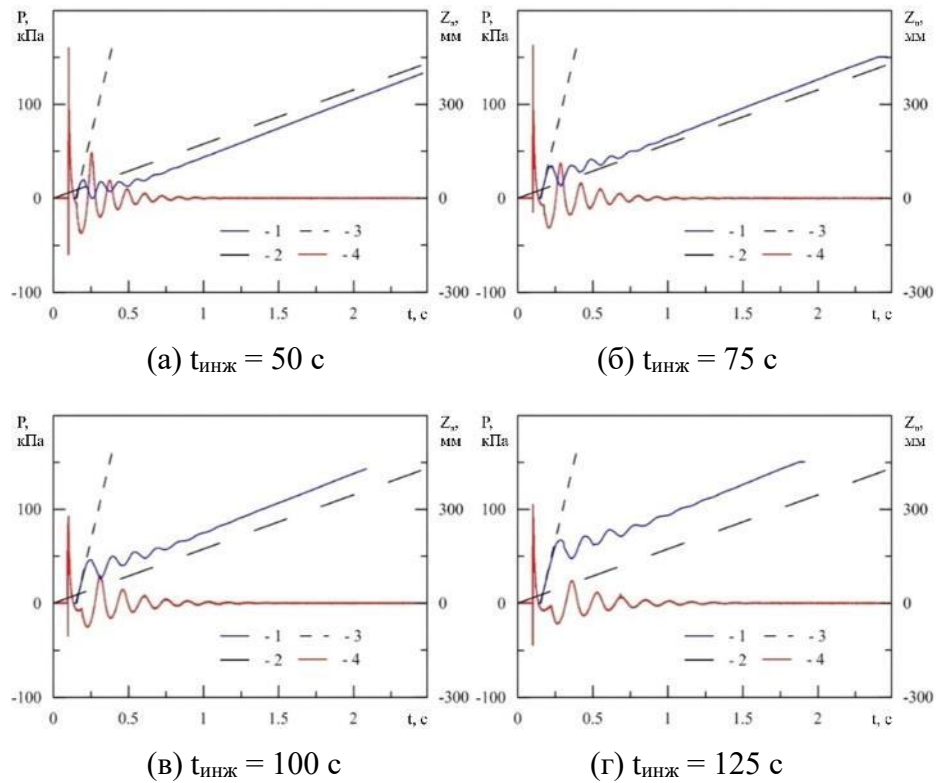


Рисунок 103 – Динамические процессы при инжекции воздуха в воду  $H=0,5 \text{ м}$   $P_0=120 \text{ кПа}$ : 1 – положение носика пузыря; 2 – расчет по формуле (1); 3 – начальная динамика фронта; 4 – давление.

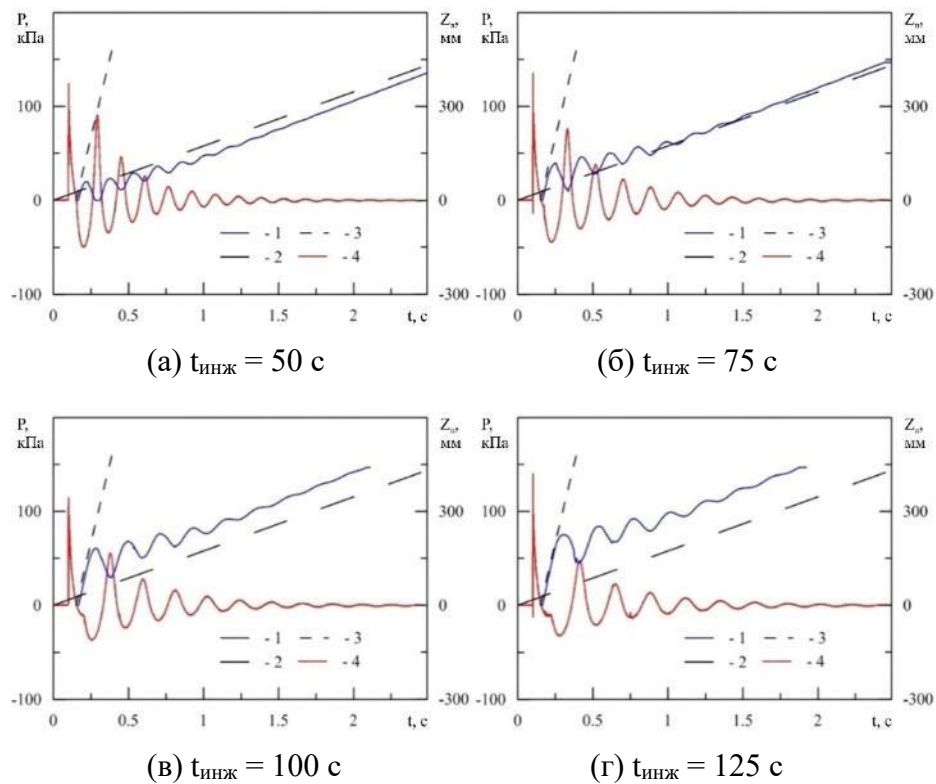


Рисунок 104 – Динамические процессы при инжекции воздуха в воду  $H=1 \text{ м}$   $P_0=120 \text{ кПа}$ : 1 – положение носика пузыря; 2 – расчет по формуле (1); 3 – начальная динамика фронта; 4 – давление.

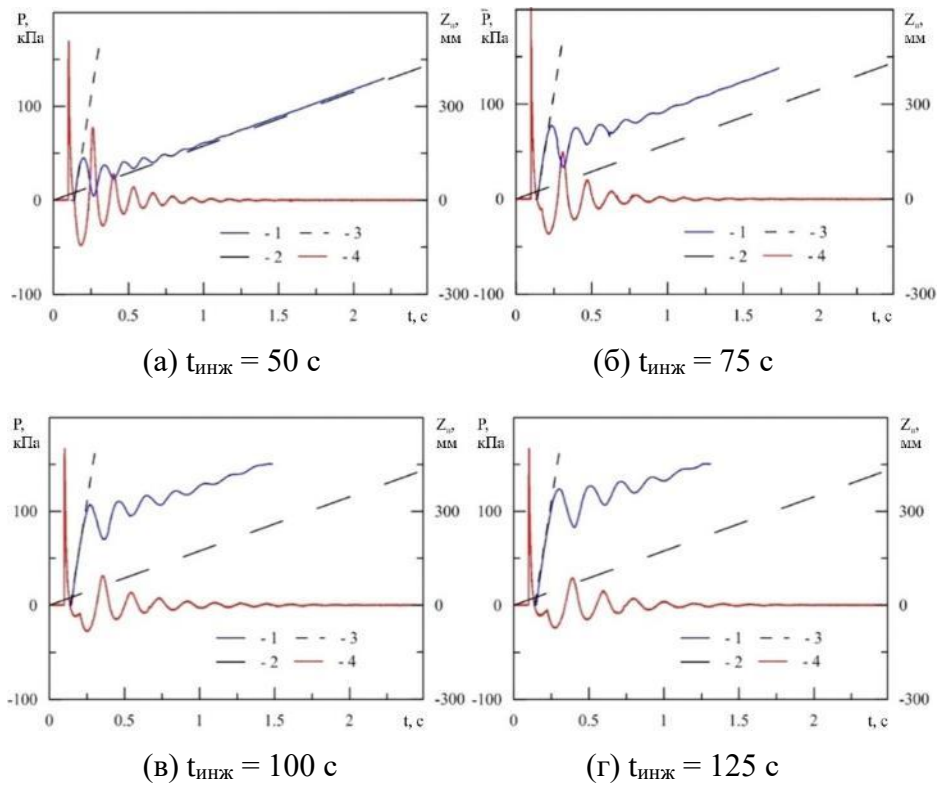


Рисунок 105 – Динамические процессы при инъекции воздуха в воду  $H=0,5 \text{ м}$   $P_0=200 \text{ кПа}$ : 1 – положение носика пузыря; 2 – расчет по формуле (1); 3 – начальная динамика фронта; 4 – давление.

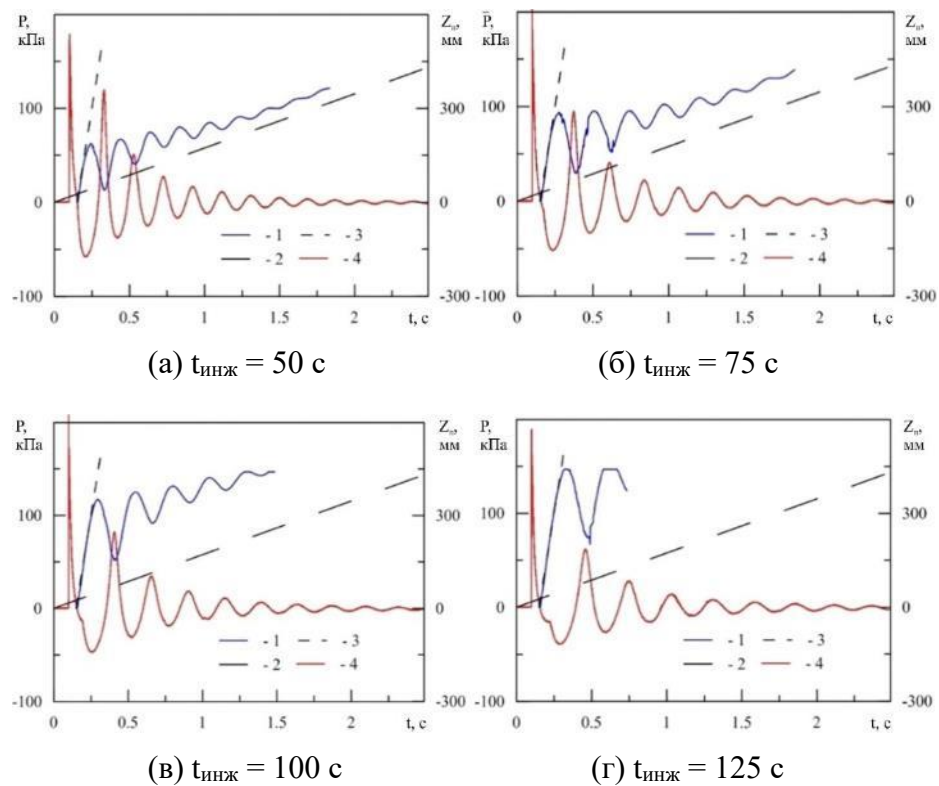


Рисунок 106 – Динамические процессы при инъекции воздуха в воду  $H=1 \text{ м}$   $P_0=200 \text{ кПа}$ : 1 – положение носика пузыря; 2 – расчет по формуле (1); 3 – начальная динамика фронта; 4 – давление.

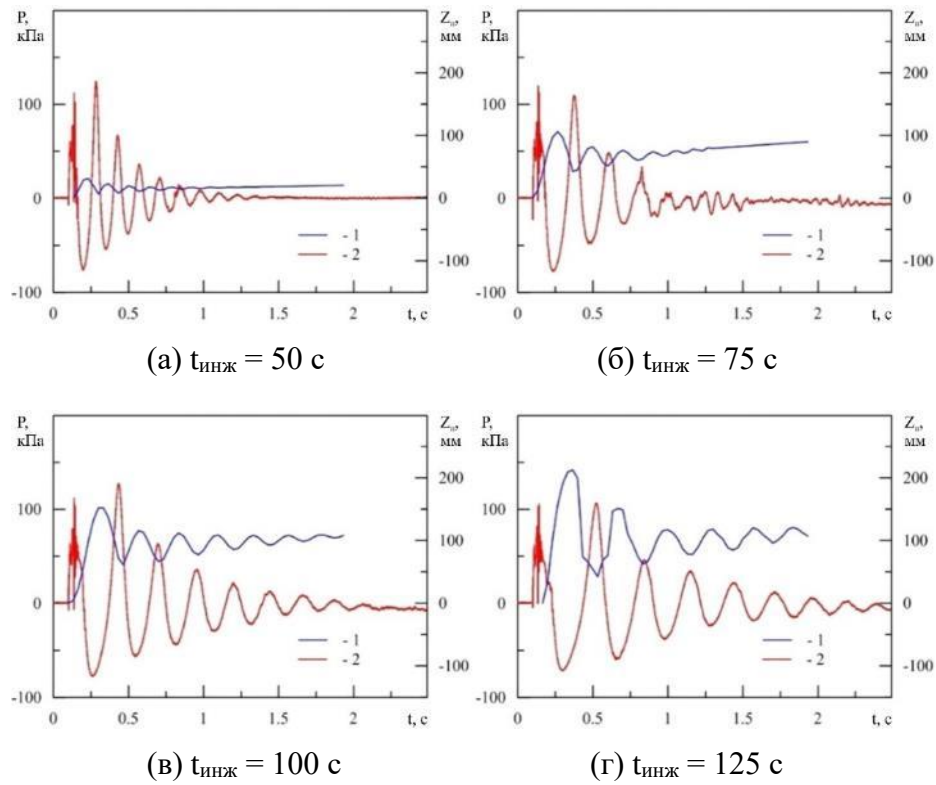


Рисунок 107 – Динамические процессы при инжекции аргона в сплав Розе:  $H=0,5 \text{ м}$   $P_0=120 \text{ кПа}$ :  
1 – положение уровня свободной поверхности; 2 – давление.

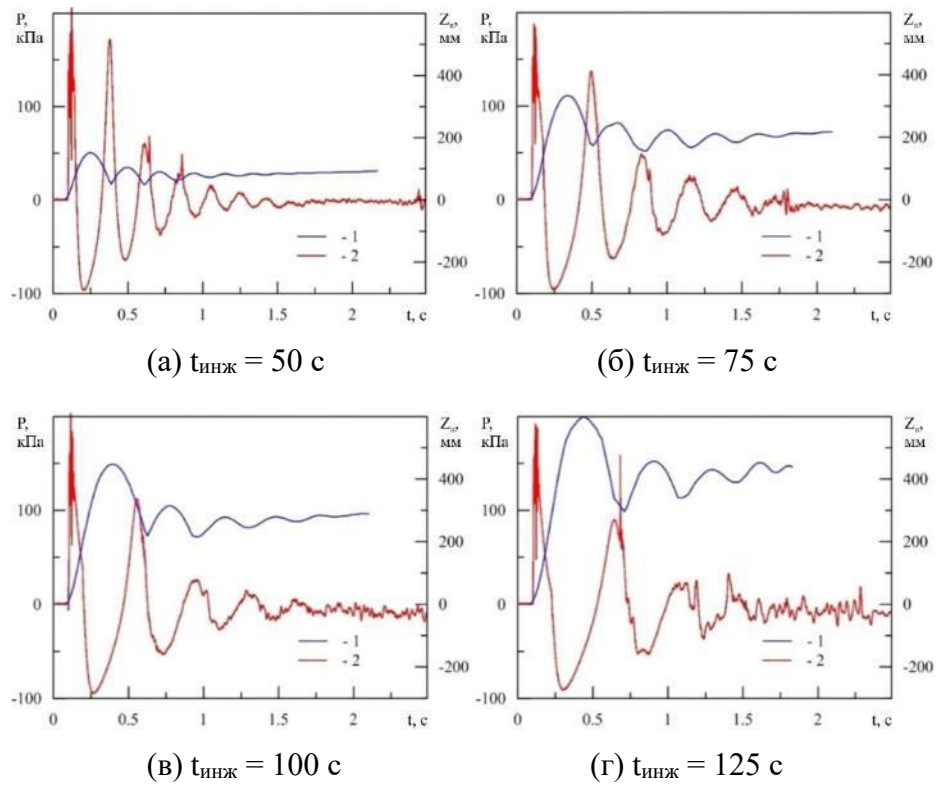


Рисунок 108 – Динамические процессы при инжекции аргона в сплав Розе:  $H=0,5 \text{ м}$   $P_0=200 \text{ кПа}$ :  
1 – положение уровня свободной поверхности; 2 – давление.

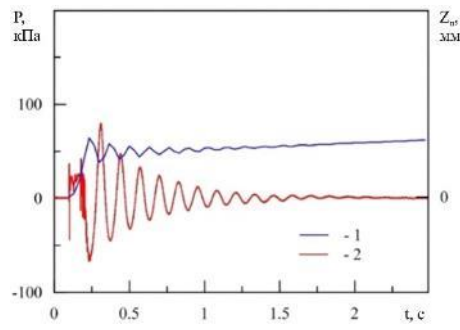
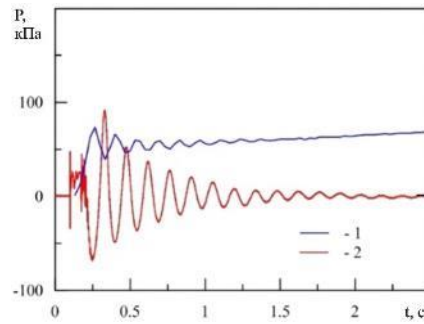
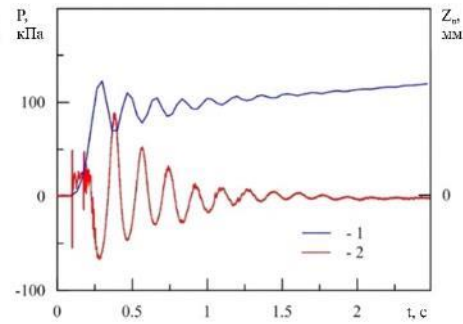
(а)  $t_{\text{инж}} = 75$  с(б)  $t_{\text{инж}} = 100$  с(в)  $t_{\text{инж}} = 125$  с

Рисунок 109 – Динамические процессы при инъекции аргона в сплав Розе:  $H=1$  м  $P_0=120$  кПа: 1 – положение уровня свободной поверхности; 2 – давление.

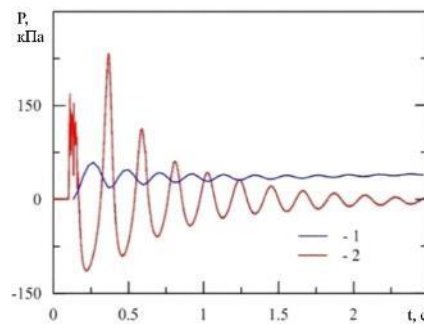
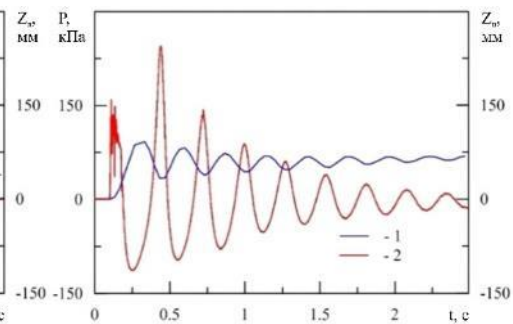
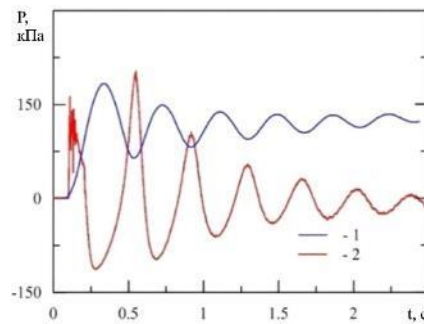
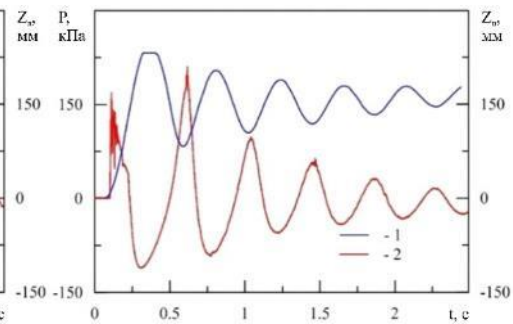
(а)  $t_{\text{инж}} = 50$  с(б)  $t_{\text{инж}} = 75$  с(в)  $t_{\text{инж}} = 100$  с(г)  $t_{\text{инж}} = 125$  с

Рисунок 110 – Динамические процессы при инъекции аргона в сплав Розе:  $H=1$  м  $P_0=200$  кПа: 1 – положение уровня свободной поверхности; 2 – давление.



## 4.6 Гидродинамика и теплообмен крупного присоединенного пузыря

### 4.6.1 Экспериментальный стенд для исследования потока с присоединенным пузырем

Схема гидравлического контура приведена на рисунке 111 а. Производилась подача жидкости из бака 1 с помощью центробежного насоса 2. Расход задавался градуированными вентилями 3 и контролировался с помощью ротаметров 4. Через входную секцию 5 жидкость поступала в вертикальную трубу ( $D=20$  мм). Входная 6, 7 и нижняя части изготовлены из нержавеющей стали. Длина входной части была 1600 мм ( $80D$ ), что обеспечивало условие установившегося потока на входе в измерительную секцию. Использовался тот же рабочий участок, как и в главе, посвященной исследованию нисходящего пузырькового потока [393, 394].

Для формирования присоединенного пузыря газ с некоторым расходом  $Q_g$  подавался через трубку 9, заведенную через штуцер 10 (см. рисунок 111 б). Кончик трубки был центрирован относительно оси трубы с помощью устройства 11. К нижнему концу трубки был присоединен газовый объем 12. Для закрепления пузыря на кончик трубки была закреплена фторопластовая насадка 13 (см. рисунок 111 б).

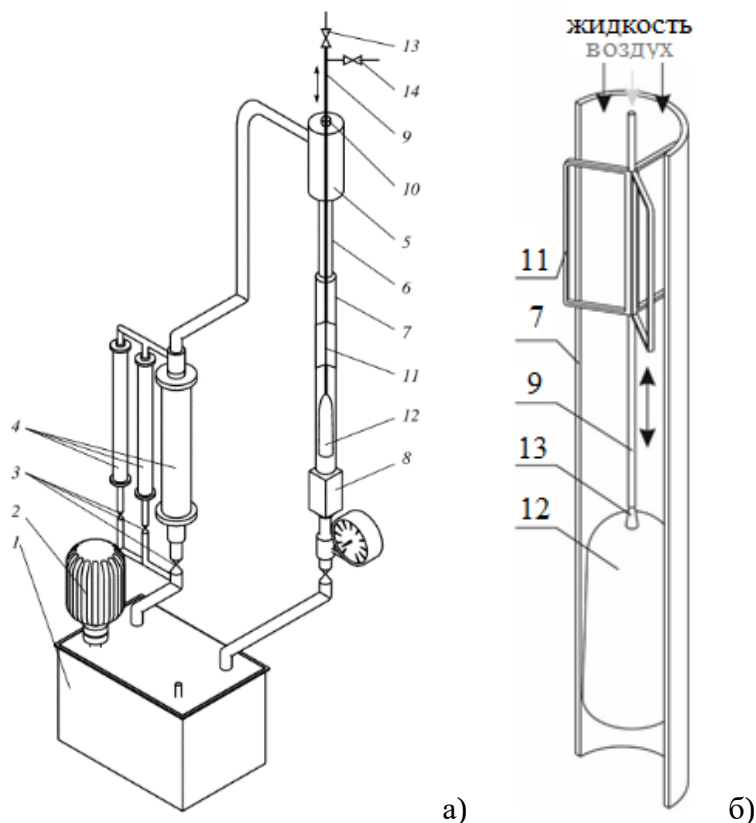


Рисунок 111 – Схема экспериментального стенда (а) и схема формирования присоединенного пузыря (б).

Оценённая неопределенность измерения составляла 3, 7,15 и 10% для измерений, проведенных с помощью оптических методов (длины пузыря  $L_{\text{п}}$ ,  $\tau_w$ , пульсаций касательных напряжений  $\tau'$  и коэффициента теплообмена  $h$  соответственно).

При инъекции газа в нисходящий поток жидкости и формировании присоединенного пузыря его форма будет зависеть от скорости жидкости. При  $V_{\text{ж}}$  равной скорости всплытия пузыря Тейлора в неподвижной жидкости (см. формулу 1), форма пузыря может быть определена с помощью уравнений 28-30. Для трубы с внутренним диаметром 20 мм эта скорость  $V_{\text{ж}}$  равна примерно 0,15 м/с.

Пузырь Тейлора может быть разделен на три области в зависимости от формы его поверхности. В литературе предлагаются соотношения для расчета толщины пленки жидкости вокруг пузыря:

$$\sigma = \frac{D}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{X(3D - 4X)} \quad (28),$$

в районе носа пузыря [182];

$$\sigma = \frac{D}{2} - \frac{D}{2} \sqrt{1 - \frac{U_0}{\sqrt{2gX}}} \quad (29),$$

для начального участка пленки жидкости [395, 396];

$$\sigma = \left( \frac{3\Gamma\nu}{g} \right)^{1/3} \quad (30),$$

для стабилизированного течения пленки жидкости [397]. Может быть получена «вмороженная» одиночная ячейка снарядного течения, в которой удобно производить исследования без использования усреднения по времени. Подобный подход был ранее использован в [182, 215].

#### 4.6.2 Гидродинамика и теплообмен потока под присоединенным пузырем

Проведенные исследования показали, что касательные напряжения вокруг пузыря зависят от расстояния от его носика ( $X$ ) и не зависят от  $L_{\text{п}}$  (см. рисунок 112а). Длина пузырей варьировалась в ходе экспериментов от 10 до 140 мм. Пузырь блокирует часть поперечного сечения трубы, что приводит к ускорению жидкости. Это приводит к резкому увеличению  $\tau_w$  с увеличением  $X$ . При этом расстояние от носика снаряда, на котором происходит скачкообразное увеличение напряжения трения на стенке, с хорошей точностью описывается формулой 28.

Подобным образом ведет себя и коэффициент теплообмена (см. рисунок 112 б). В регионе носика пузыря наблюдается резкий рост коэффициента теплообмена, затем начинается начальный участок пленочного течения, в котором происходит плавный рост  $h$ .

С дальнейшим увеличением  $X$  толщина жидкости вокруг пузыря уменьшается, что приводит к постепенному увеличению  $\tau_w$  и  $h$ . Эта область является начальным участком пленочного течения.

Проведены съемки течения пленки вокруг пузыря Тейлора длиной около 1300 мм (см. рисунок 113). Расстояние между дном пузыря и выходом из трубы было не менее 500 мм, чтобы избежать влияния выхода на течение пленки жидкости. Для поддержания постоянной длины пузыря подбирался необходимый расход газа ( $Q_g = 400$  мл/мин). При  $X = 500$  начинается возмущение жидкой пленки, выражающееся в виде чередования течения невозмущенной пленки и появления небольших поверхностных волн. При увеличении  $X$  количество волн и их амплитуда возрастают, вплоть до волнового течения.

Это объясняет распределения касательных напряжений и коэффициента теплообмена вокруг пузыря Тейлора достаточно большой длины. На расстоянии около 240 мм ( $X/D=12$ ) от носика снаряда наблюдается установление стабилизированного течения пленки жидкости (см. рисунок 114а). Ранее подобный эффект был обнаружен в [191]. В этой области коэффициент теплообмена не зависит от расстояния от  $X$ . На расстоянии порядка  $X/D=25$  наблюдается значительное повышение  $h$  в пленке жидкости. Это вызвано изменением режима течения пленки жидкости.

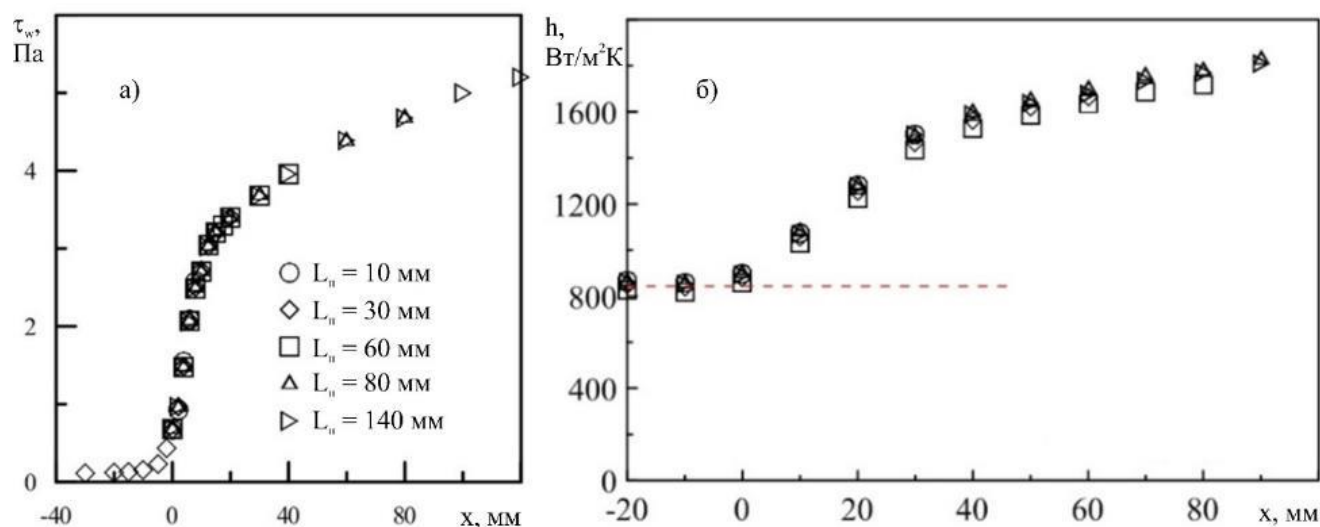


Рисунок 112 – Распределение напряжения трения (а) и коэффициента теплообмена (б) на разных расстояниях от носика пузыря.

Результаты измерения напряжения трения на стенке под снарядом приведены на рисунке 114б. Согласно [203, 205, 205, 207] вблизи границы раздела газ-жидкость наблюдаются большие значения скорости. У стенки трубы был обнаружен большой градиент скорости жидкости. Это является причиной наблюдаемой зависимости  $\tau_w(X)$ .

Подобное распределение напряжения трения на стенке в начальном участке газового пузыря, движущегося в жидкости, приведено в [201, 211, 214, 398]. При  $X/D=11$  наблюдается установление режима стабилизированного течения пленки жидкости. Напряжение трения в этой области не зависит от расстояния от носика пузыря. При  $X/D \sim 25$  и выше наблюдается рост напряжения трения на стенке. Небольшое падение напряжения трения на стенке на большом удалении от носика снаряда возможно связано с расположением датчика в трехмерной волновой структуре или с некоторым увеличением толщины пленки жидкости, что заметно при сравнении фотографий при  $X = 700$  и  $1000$  мм (рисунок 113). Внезапный рост  $\tau_w$  в пленке жидкости на некотором расстоянии от носика снаряда ранее показан в [214].

Зависимость относительных пульсаций напряжения трения ( $\varepsilon = \tau'/\tau$ ) на стенке от  $X$  приведена на рисунке 115 а. В начальном участке пузыря Тейлора наблюдается плавное снижение относительных пульсаций напряжения трения на стенке. Далее следует участок, на котором пульсации напряжения трения на стенке практически равны нулю. Здесь происходит значительное уменьшение турбулентных пульсаций жидкости, поэтому имеет место ламинаризация потока. Предположение о ламинаризации жидкой пленки в начальной части пузырька вследствие ускорения жидкости сделано в [182].

В стабилизированной пленке жидкости наблюдается нарастание пульсаций напряжения трения на стенке с увеличением  $X$ . При  $X=500$  мм происходит резкий рост перемежаемости, а при  $X=700$  мм происходит смена режима течения пленки. В сигнале датчика  $\tau_w$  сначала появляются кратковременные возмущения, имеющие вид одиночных пиков. При удалении от носика снаряда количество таких пиков в единицу времени увеличивается. При больших  $X$  сигнал датчика трения имеет форму сигнала с постоянным возмущением. Это хорошо видно на гистограмме распределения напряжения трения на стенке (см. рисунок 115 б). Поведение перемежаемости в данной области (см. рисунок 116) характерно для пленочного режима течения и хорошо описывается с помощью модели [399].

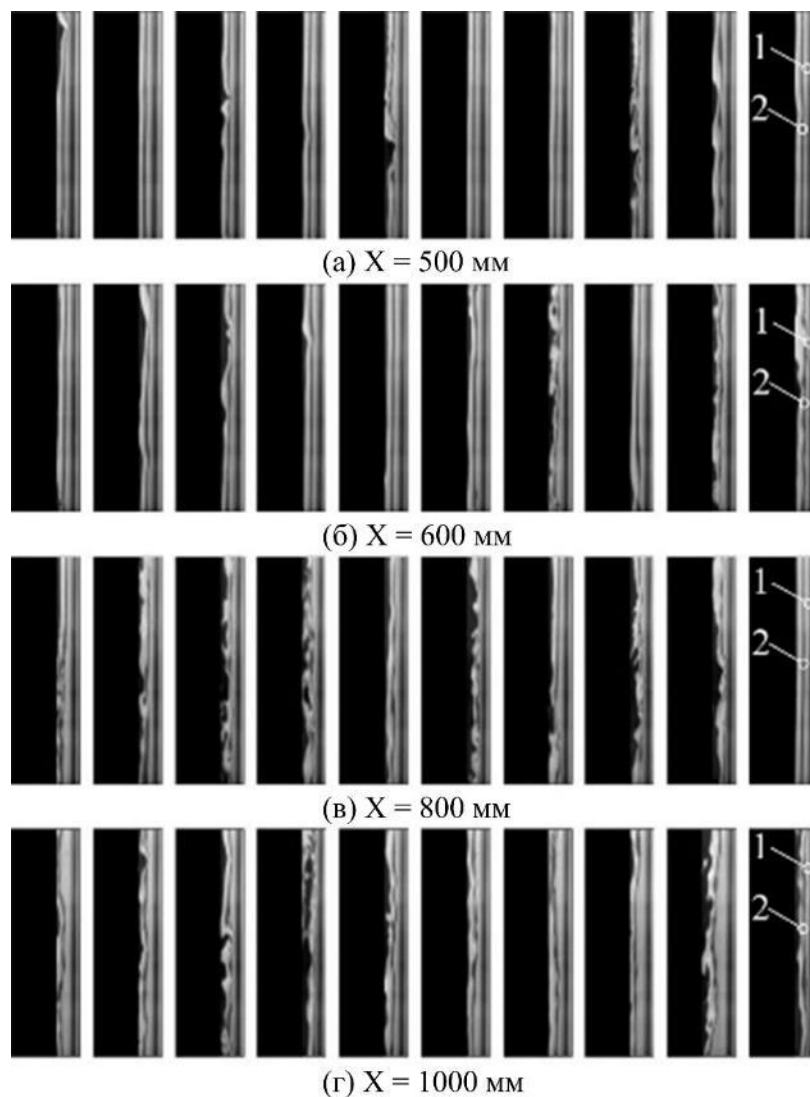


Рисунок 113 – Фотографии пленки жидкости на разных расстояниях от носика пузыря: 1 – внешняя стенка трубы; 2 – межфазная поверхность.

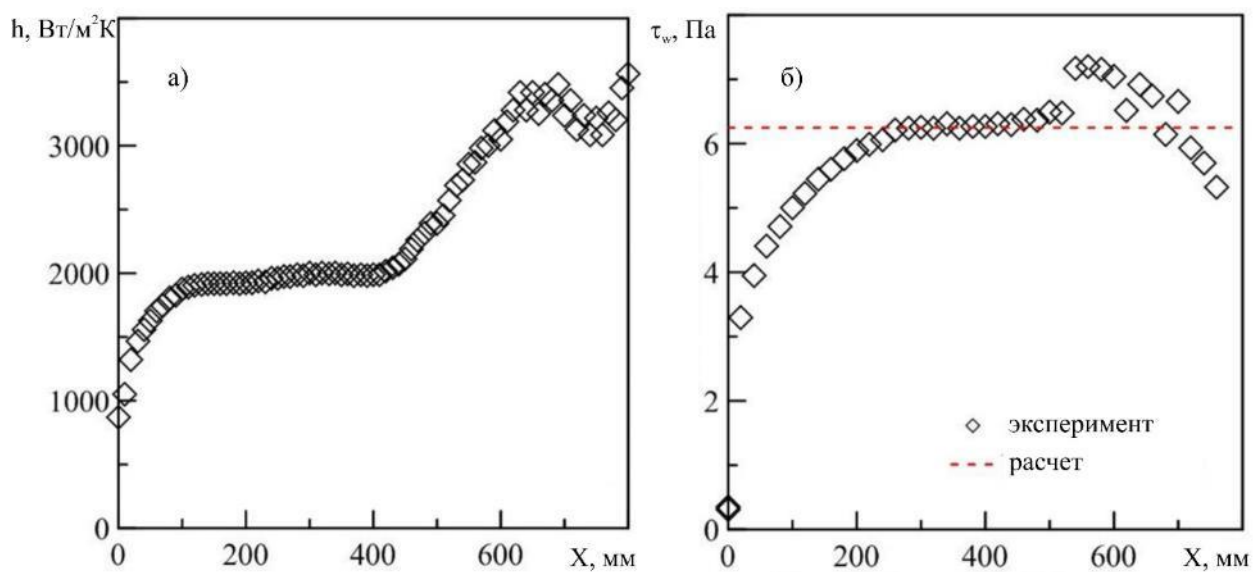


Рисунок 114 – Распределение коэффициента теплообмена (а) и напряжения трения на стенке (б) вдоль достаточно длинного пузыря.

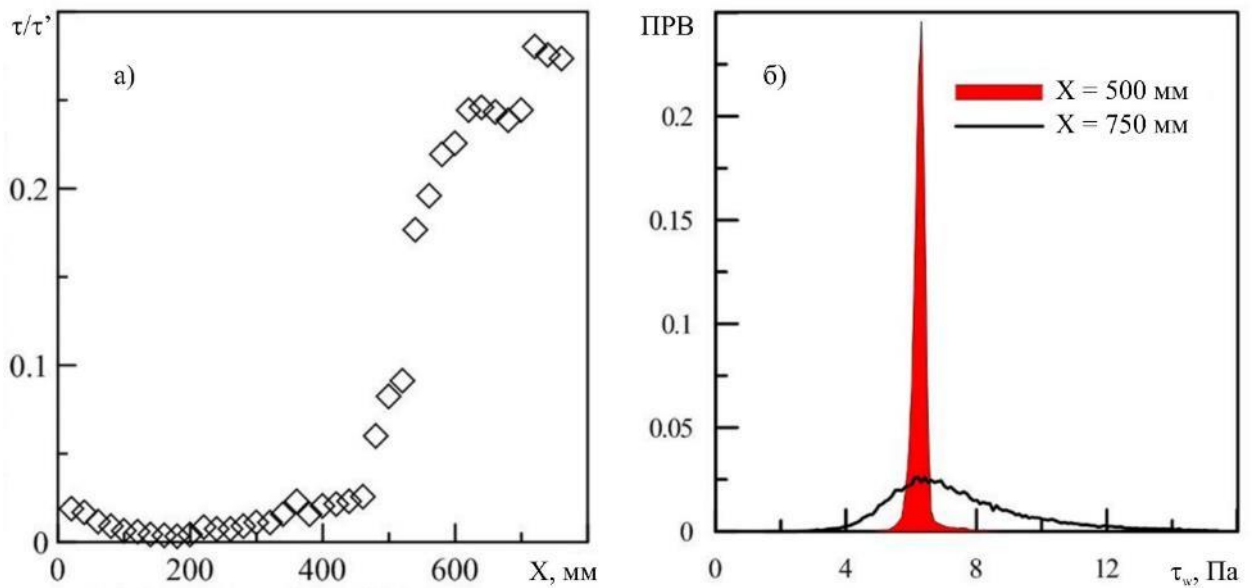


Рисунок 115 – Распределение относительных пульсаций напряжения трения на стенке вдоль пузыря (а) и распределение напряжения трения на стенке на разных расстояниях от носика пузыря (б).

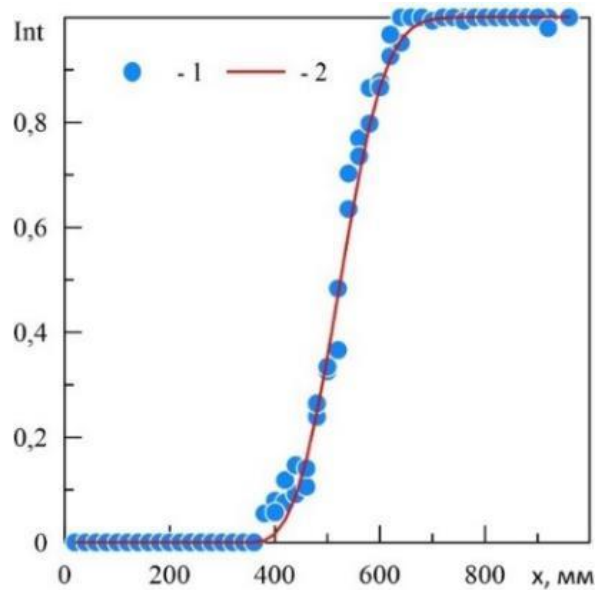


Рисунок 116 – Перемежаемость на разных расстояниях от носика пузыря: 1 – экспериментальные данные; 2 – расчеты по модели [399].

Визуальные наблюдения показывают, что пузырь колеблется в потоке. Имеется связь между пульсациями формы пузыря и колебаниями его дна. В работе [196] было показано, что дно газового пузыря колеблется с частотой порядка 2-7 Гц. Подобные данные были получены при обработке видеозаписей стационарного пузыря Тейлора. На поверхности пузырей с малой длиной наблюдаются капиллярные волны (см. рисунок 117 а). Чем короче исследуемый пузырь,

тем ближе первая волна от носика снаряда. Длины волн выше для малых  $X$ . Зависимость длины волны от расстояния до носика пузыря Тейлора приведена на рисунке 117 б. Для сравнения на графике приведены данные модели [400], основанной на данных, полученных при всплытии пузырей Тейлора в неподвижной жидкости в трубах. Предложенная модель хорошо описывает данные экспериментов с присоединенным пузырем.

Проведена серия экспериментов с вариацией расхода жидкости. Фотографии потока приведены на рисунке 118. При увеличении  $V_{\text{ж}}$  меняется форма присоединенного пузыря, его нос становится более «заостренным», увеличивается толщина обтекающей пузырь пленки жидкости и амплитуда колебаний дна пузырей. Интенсифицируется отрыв пузырей от донной части пузырей, и для поддержания их длины приходится увеличивать  $Q_{\text{г}}$ .

Однако  $\tau_w$  под пузырем в районе начального участка пленочного течения не зависит от расхода жидкости (см. рисунок 119 а, б). На рисунке 119 а приведена область вблизи носика пузыря. На расстоянии около 30 мм выше по потоку от носика пузыря наблюдаются значения  $\tau_w$ , характерные для однофазного режима течения. При приближении к носу газового пузыря наблюдается увеличение напряжения трения на стенке, вызванное перестроением потока. Вблизи носика присоединенного пузыря наблюдается слабое различие между измеренными значениями  $\tau_w$ . При этом они несколько выше для малых  $V_{\text{ж}}$ .

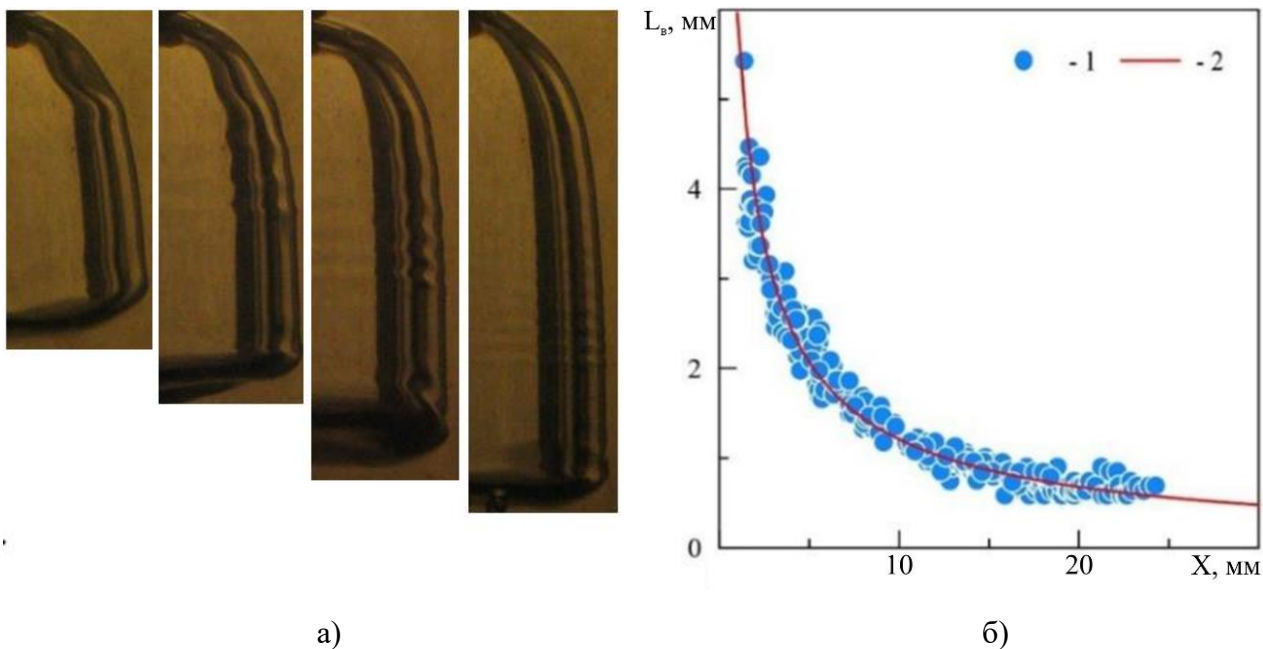


Рисунок 117 – Фотографии присоединенных пузырей малой длины (а) и длины капиллярных волн на поверхности пузырей (б): 1 – экспериментальные данные; 2 – расчет по модели [400].

В области начального течения жидкой пленки измеренные значения  $\tau_w$  практически не отличаются для разных  $V_{ж}$  (см. рисунок 119 б). Далее следует область с постоянной зависимостью  $\tau_w(X)$  – устанавливается стабилизированное пленочное течение. Переход к течению стабилизированной пленки жидкости происходит на большем расстоянии при увеличении  $V_{ж}$ . Напряжение трения в области установившегося течения пленки хорошо описывается формулой Нуссельта (см. рисунок 120 а):

$$\tau_w = \rho g \sigma \quad (31),$$

где  $\sigma$  – толщина пленки жидкости.

При увеличении  $X$  пленка начинает терять стабильность, что выражается в увеличении пульсаций напряжения трения на стенке (см. рисунок 120 б). В итоге происходит переход от ламинарного течения пленки к волновому, что было описано выше для малого расхода жидкости. При постоянном  $Q_{г}$  переход медленнее происходит для малых  $V_{ж}$ .

При помощи системы «Полис - PIV» были проведены исследования гидродинамической структуры течения вокруг пузырей при  $V_{ж} = 0,15$  и  $0,30$  м/с (см. рисунок 121). При натекании потока происходит перестройка течения. При большей  $V_{ж}$  скорость набегающего потока выше, однако под пузырем значения максимальной скорости жидкости сравнимы. Градиент скорости в пристенной области приблизительно равен для обоих случаев. Поэтому в этой области наблюдаются похожие значения  $\tau_w$ .

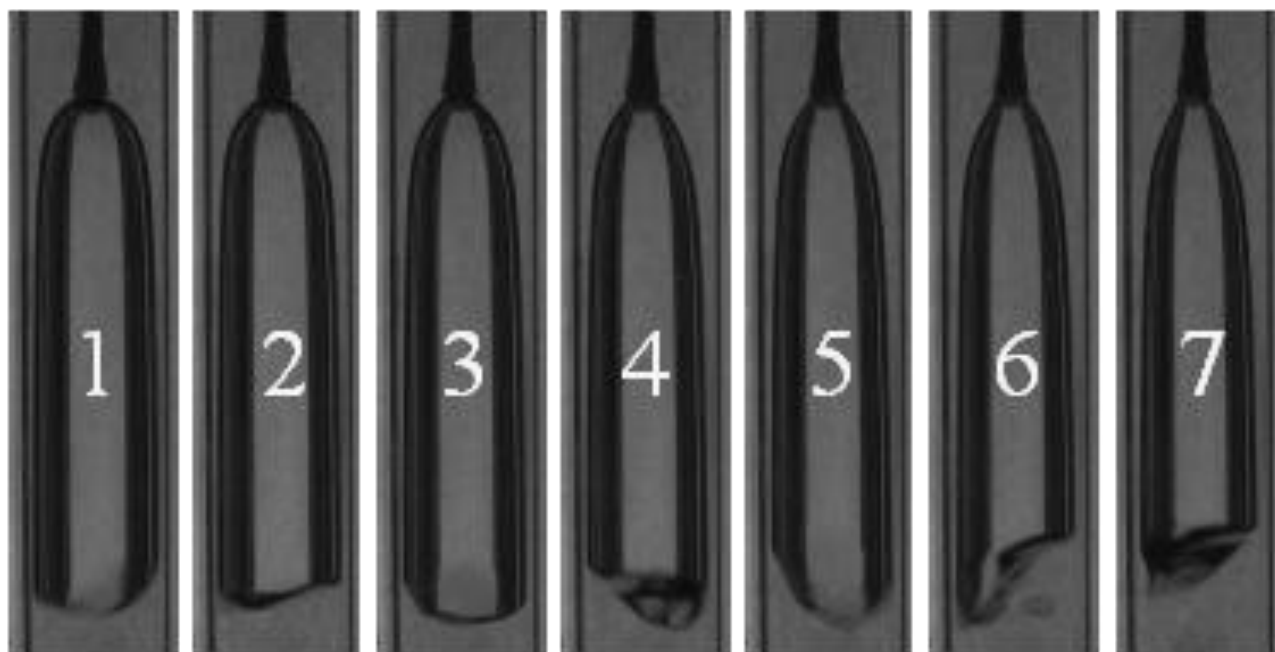


Рисунок 118 – Фотографии пузырей при вариации скорости жидкости: 1 –  $V_{ж} = 0,15$  м/с; 2 –  $V_{ж} = 0,16$  м/с; 3 –  $V_{ж} = 0,18$  м/с; 4 –  $V_{ж} = 0,20$  м/с; 5 –  $V_{ж} = 0,22$  м/с; 6 –  $V_{ж} = 0,26$  м/с; 7 –  $V_{ж} = 0,3$  м/с.



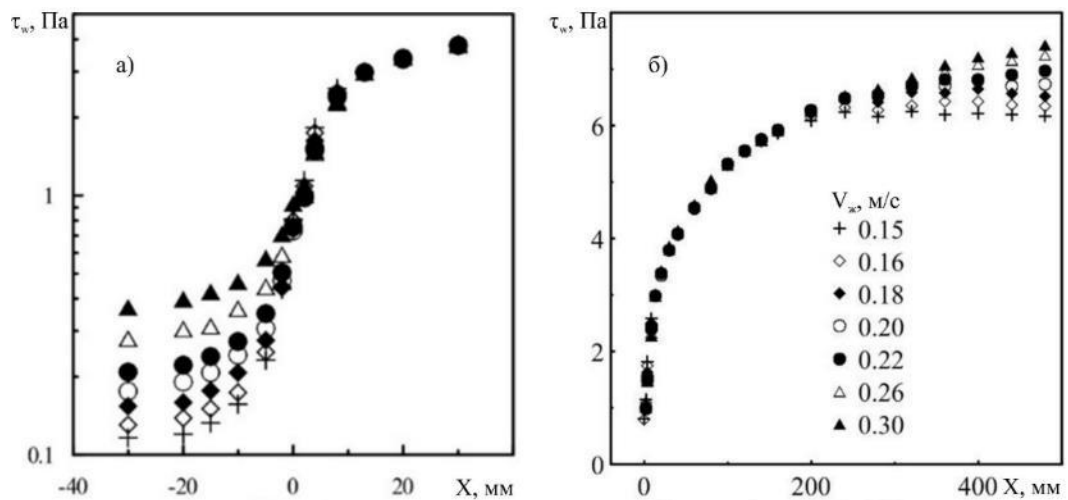


Рисунок 119 – Распределение напряжения трения на стенке при вариации скорости жидкости: а – вблизи носика пузыря; б – под пузырем.

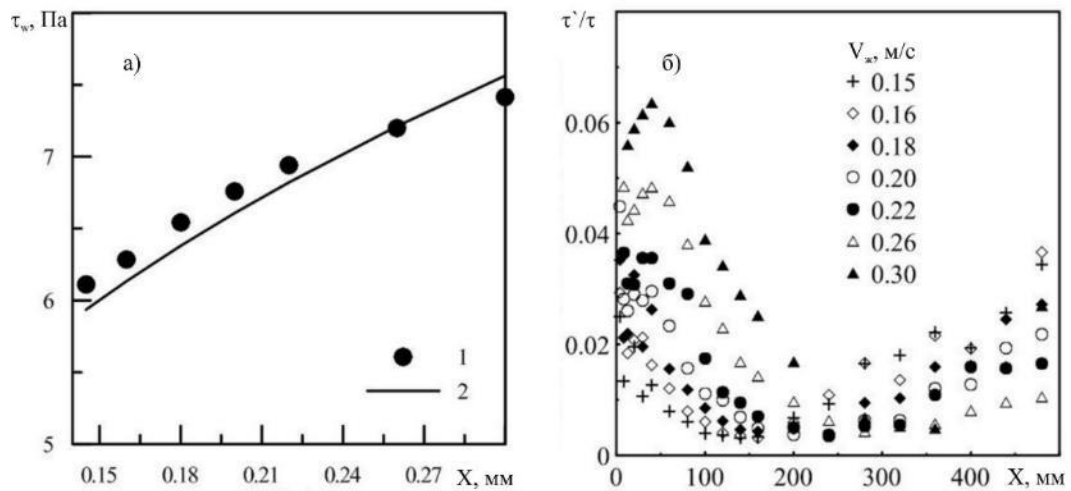


Рисунок 120 – Напряжение трения на стенке в области установившегося движения пленки жидкости (а) и относительные пульсации напряжения трения на стенке вдоль присоединенных пузырей.

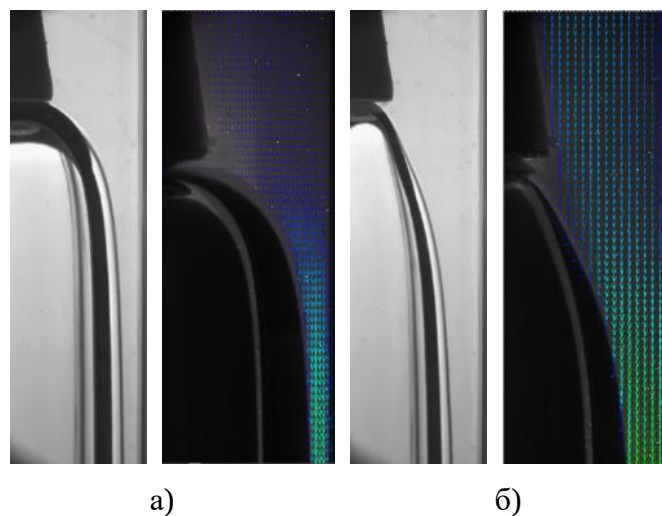


Рисунок 121 – Гидродинамическая структура течения жидкости вблизи носика пузыря: а –  $V_{ж} = 0,15$  м/с; б –  $V_{ж} = 0,30$  м/с.

## 4.7 Выводы

На основе моделирования газожидкостным потоком двухфазных течений, которые могут возникать в реакторных установках с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем, получены следующие результаты:

- при инъекции дисперсной фазы высокого давления в теплоноситель при повреждении теплообменной трубки парогенератора может происходить формирование мелкодисперсной газовой/паровой фазы и крупного присоединенного пузыря, течений с блоками, отрывных и нисходящих двухфазных потоков, развитие пульсаций давления и захлаживание теплоносителя;
- показаны особенности развития структуры нисходящего пузырькового потока в зависимости от дисперсного состава легкой фазы в режимах с интенсификацией (до 50%) и подавлением (более, чем на 40%) теплообмена, вызванных существенным изменением локальных гидродинамических параметров (осредненных, пульсационных и спектральных);
- выявлено, что добавление дисперсной фазы в восходящий поток с внезапным расширением трубы практически не приводит к изменению теплообмена в отрывной области течения, однако ниже по потоку может наблюдаться существенная (до трех раз) интенсификация теплообмена, с помощью PIV/PLIF показаны особенности локальных гидродинамических параметров в этих областях;
- получены детальные данные о влиянии блокады на локальные гидродинамические характеристики одно- и двухфазного потока модельного теплоносителя: осредненное и пульсационное трение, поле скорости жидкости, пространственное перераспределение дисперсной фазы;
- определены закономерности формирования пузырей при инъекции дисперсной фазы в расплав тяжелого жидкометаллического теплоносителя с визуализацией, скорости движения газовых пузырей, эволюция развития колебательных процессов и особенности теплообмена теплоноситель/дисперсная фаза;
- показано, что вокруг присоединенного крупного пузыря по сравнению с однофазным потоком наблюдается значительное повышение напряжения трения на стенке (в десятки раз), коэффициента теплообмена (до трех раз), однако подобные эффекты уменьшаются с ростом скорости жидкости.

## **5 Моделирование течений в элементах реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями**

Для разработки перспективных энергокомплексов с реакторными установками на быстрых нейтронах необходимо проведение исследований неизотермических течений ТЖМТ, встречающихся в соединениях трубопроводов или ячейках ТВС в случае неравномерного тепловыделения ТВЭЛОВ.

Целями таких работ являются:

- получение данных по тепловой перемежаемости течения ТЖМТ для обоснования расчетных моделей турбулентности для жидких металлов, выполнения процедур валидации и верификации CFD кодов;
- получение данных по закономерности изменения температуры при нестационарном течении ТЖМТ в условиях тепловой неоднородности течения, в том числе при наличии в канале с теплоносителем конструктивных элементов, возмущающих течение модельного ТЖМТ.

### **5.1 Смешение разнотемпературных потоков тяжелого жидкометаллического теплоносителя**

#### **5.1.1 Схема и описание экспериментального стенда для изучения процессов в камерах смешения**

Стенд состоит из системы трубопроводов, рабочего участка, баков и измерительной аппаратуры (см. рисунок 122). Для проведения экспериментов по смешению потоков холодного и горячего жидкометаллического теплоносителя использовался модельный теплоноситель – сплав Розе, который изначально разогревался в основном баке, находящемся внизу установки [401–403]. Объем основного бака 46 литров. После разогрева сплава и перехода его в жидкое состояние поддерживалась постоянная температура при помощи автоматической системы. Эта температура соответствует температуре «холодной» жидкости ( $T_{\text{хол}} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Рабочий участок - Т – образный смеситель состоит из двух нержавеющей труб, сваренных под прямым углом (см. рисунок 123). Внутренний диаметр основной трубы, в которую подавалась «холодная» жидкость – 20 мм, внутренний диаметр трубы, подводящей «горячий» поток жидкости – 8 мм. Толщина стенок основной и подводящей труб 1 мм. Схема смесителя, система координат и область проведения тепловых измерений приведена на рисунке 123 б.

Смеситель помещен в бокс, через который непрерывно производится прокачка горячего воздуха, температура которого соответствует температуре «холодной» жидкости. Для проведения тепловизионных измерений в боксе предусмотрены окна.

Для организации течения разнотемпературных потоков имеются два бака, расположенные вверху стенда. При старте эксперимента рабочая жидкость закачивалась в бак для «горячей» жидкости, где производился подогрев до требуемой температуры ( $T_{\text{гор}} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). После этого производилась закачка жидкости в бак для «холодной» жидкости. Объемы верхних баков 23 литра. В обоих баках производилось непрерывное перемешивание жидкости.

Система трубопроводов, соединяющих основной бак и верхние баки, снабжена индивидуальными нагревателями, с помощью которых во время эксперимента поддерживается температура  $T_{\text{хол}}$ . Подводящие к Т-образному смесителю трубы сделаны из нержавеющей стали и также снабжены системой тепловой стабилизации, которая поддерживает температуру труб, равную температуре «холодной» и «горячей» рабочей жидкости для основного и бокового подводов соответственно.

Трубы обмотаны тонким слоем тепловой изоляции (асбестовая лента) для избегания высокой тепловой инерции. Аналогичная система управления температурой использовалась для запорных и контрольных вентилях. Непосредственно перед Т-образным смесителем имелись прямые участки трубопроводов длиной 30 калибров, служащие для стабилизации потоков жидкости.

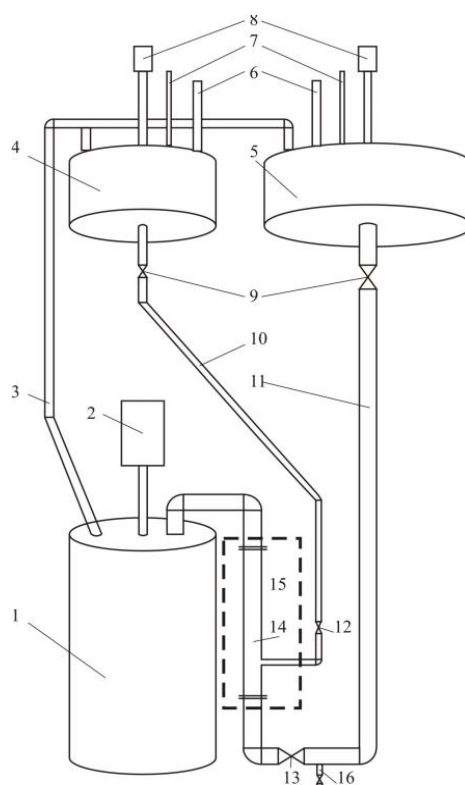
### 5.1.2 Описание эксперимента

Эксперименты проводились в циклическом режиме. Жидкость из основного бака закачивалась в верхние баки. С помощью нагревателей и теплообменников производилось выведение температур жидкости в этих баках на требуемые значения. Затем открывались запорные вентили и начинался эксперимент. Различные расходы «холодного» и «горячего» потока устанавливались предварительно проградуированными вентилями. Для предотвращения заполнения полостей труб газом производилась принудительная остановка экспериментов, когда объем жидкости в любом из баков падал до приблизительно 10% от номинальной емкости.

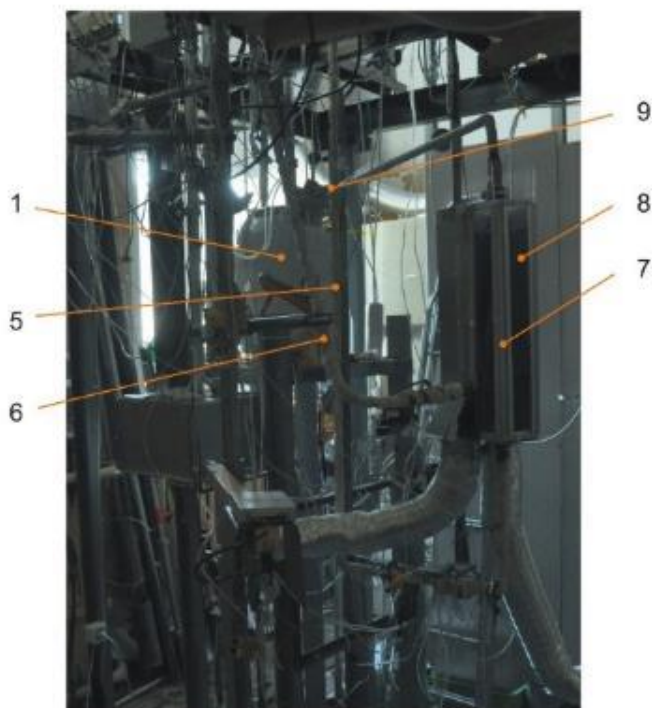
После этого жидкость вновь закачивалась в верхние баки и производился следующий цикл подготовки и проведения эксперимента. В течение всего времени производилось непрерывное измерение температур жидкости в верхних баках, нижнем баке, температур жидкости перед входом в смеситель, расходов основного и дополнительного потоков.

Измерение распределения температуры на внешней стенке трубы области смешения потоков производилось методом инфракрасной термографии. Для измерения распределения температуры на стенке использовался скоростной инфракрасный сканер Flir Titanium 570M. Поле температур на поверхности стенки измерялось с разрешением  $132 \times 512$  пикселей, частотой кадров 400 Гц и чувствительностью 18 мК. Приемником излучения является КРТ-детектор (кадмий–ртуть–теллур), охлаждаемый до азотной температуры встроенной системой, работающей по циклу Стирлинга. Спектральный диапазон работы детектора – от 3,7 мкм до 4,8 мкм. Сканирование поверхности производилось с расстояния, не превышающего 1 м. Стенки тройника были покрашены черной краской.

Тепловизионные измерения производились с трех позиций, расположенных под углом 60 градусов относительно друг друга и оси рабочего участка (см. рисунок 124 а). На рисунке 124 б приведены примеры одиночных кадров при съемке с разных углов. Это позволяло восстановить картину распределения температуры стенки в развертке 180 градусов. Расстояние по высоте рабочего участка, на котором производились измерения от 0 до 150 мм относительно оси симметрии бокового подвода тройника.



а)



б)

Рисунок 122 – Схема экспериментальной установки: 1 – основной бак; 2 – бак для «холодной» жидкости; 3 – бак для «горячей» жидкости; 4 – линия подвода жидкости к бакам; 5 – линия подвода «холодной» жидкости; 6 – линия подвода «горячей» жидкости; 7 – бокс с подводом горячего воздуха; 8 – смеситель; 9 – точка слива.

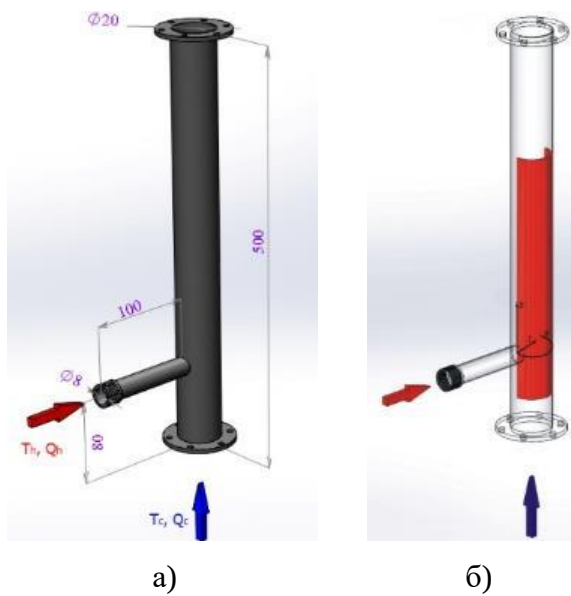


Рисунок 123 – Конструкция и размеры Т-образного смесителя (а) и система координат, красным цветом выделена область измерений (б).

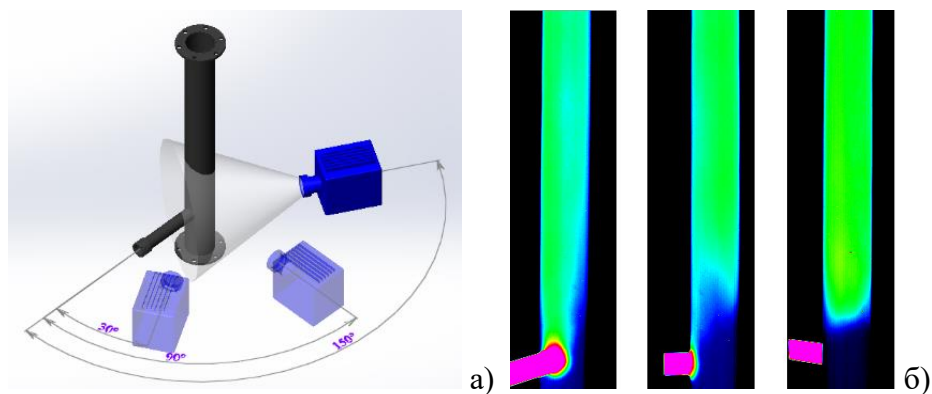


Рисунок 124 – Схема проведения экспериментов и примеры получаемых изображений.

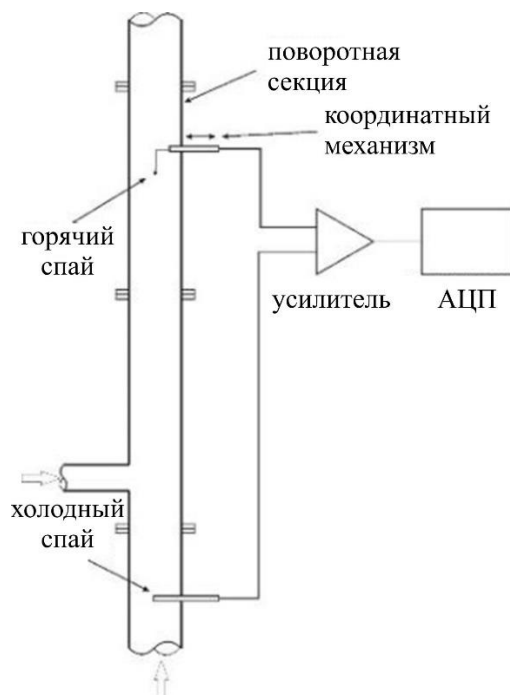


Рисунок 125 – Схема измерения профилей температуры.

Измерение температуры жидкости в области смешения проводились при помощи мобильной термопары (медь-константан). Диаметр проводов термопары 0,12 мм. Термопара закреплялась в Г-образную державку. Рабочий спай термопары располагался навстречу потоку (см. рисунок 125). С помощью координатного механизма производилось поперечное перемещение рабочего спая термопары в выделенном сечении области смесителя вдоль оси симметрии. Минимальное расстояние спая термопары от внутренней поверхности трубы смесителя – 1 мм, максимальная позиция термопары соответствует оси трубы. Шаг изменения расположения термопары – 1,5 мм. Азимутальная координата точки измерения температуры жидкости изменялась путем поворота блока термопары с шагом 45°.

### 5.1.3 Измерение температуры

Измерения температуры в элементах конструкции экспериментального контура производились с помощью термометров сопротивления и термопар. Использовались термометры сопротивления типа ДТС (ТУ 4211-023-46526536-2009). В баки с рабочей жидкостью помещались три термометра ДТС055-50М ( $\alpha = 0.00428 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). Для контрольных измерений использовался термометр ДТС035-100П класса допуска А ( $\alpha = 0.00391 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). При контрольных измерениях он подключался по четырехпроводной схеме последовательно с образцовым резистором сопротивлением 100 Ом (0.1%, 125 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ). Ток в цепи устанавливался на уровне 1 мА с помощью магазина сопротивлений. Напряжения усиливались прецизионным усилителем с коэффициентом 10 и измерялись вольтметром MXD 5040. Термометры сопротивления ДТС055-50М подключались к измерителям – регуляторам микропроцессорным 2ТРМ-1-Д.У.РР.

Для измерения температуры жидкости на входе в рабочий участок использовались термопары типа К (хромель – алюмель). Провода имели диаметр 0,25 мм и были покрыты тефлоновой изоляцией. Рабочие спаи термопар были заделаны в державки из нержавеющей трубки диаметром 3 мм. Термопары вклеивались в державки с помощью высокотеплопроводного компаунда, обеспечивающего электрическую изоляцию спая от корпуса и рабочей жидкости. Данный способ заделки обеспечивал малую тепловую инерционность термопар. Термопары подключались к двухканальному измерителю – регулятору 2ТРМ-1-Д.У.РР.

Для измерения расхода жидкости использовались оригинальные поплавковые расходомеры, которые были помещены в баки для «холодной» и «горячей» жидкостей. Поплавки выполнены из алюминиевого сплава. Штоки поплавков были выведены в прозрачные колбы, закрепленные на крышках баков. Схема измерения расхода жидкости приведена на рисунке 126. При помощи светодиодных лент, расположенных с противоположной от камеры стороны трубок,

была реализована теневая методика съемки. Она позволяла точно определять границу верхней кромки поплавок. Для получения равномерной подсветки использовался рассеивающий экран. Данные о перемещении штоков поплавков при помощи цифровых видеокамер непрерывно передавались и обрабатывались в реальном масштабе времени на персональном компьютере.

#### 5.1.4 Оценка неопределенности измерений

**Расход жидкости.** В процессе эксперимента происходил свободный слив рабочей жидкости из верхних баков. При этом происходило понижение уровня жидкости в баках. Минимальное изменение уровня жидкости составляло 40 мм. Начальное и конечное положение поплавка регистрировалось с точностью менее 0,5 мм. Следовательно, максимальная погрешность разницы уровня в начале и конце слива составляла 1 мм. Таким образом, максимальная погрешность измерения среднего расхода в процессе эксперимента составляла 1/40, или 2,5%. Следовательно, неопределенность измерения среднего расхода  $\pm 2,5\%$ .

**Температура рабочей жидкости.** Отклонение от калибровочной зависимости для термометра сопротивления (класс допуска А) равна:

$$\Delta t = \pm 0,15 + 0,002 \cdot t \quad (32),$$

где  $\Delta t$  и  $t$  измеряются в  $^{\circ}\text{C}$ .

Для  $t = 150^{\circ}\text{C}$   $\Delta t = 0,45^{\circ}\text{C}$

Для термопар, измеряющих температуры рабочей жидкости на входе рабочего участка, производилось сравнение показаний соответствующего измерителя – регулятора с показанием образцового термометра в рабочем диапазоне температур. Разница не превышала  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, неопределенность измерения температур на входе рабочего участка не превышала  $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ .

**Профили температуры в потоке.** Поскольку температура жидкости в потоке измерялась термопарой, работающей в дифференциальном режиме, погрешность смещения нулевого показания исключалась. Общая погрешность измерения определялась чувствительностью регистрирующей аппаратуры и составляла в стационарных условиях  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

**Температура стенки.** Измерение температуры стенки производилось инфракрасной видеокамерой типа Flir Titanium 570M. Наружная стенка рабочего участка покрывалась черной матовой краской, что обеспечивало коэффициент излучения 0,95. Неопределенность измерения температуры, согласно инструкции прибора, составляет  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ .



### 5.1.5 Оценка нестационарности эксперимента

Основным источником гидродинамической нестационарности исследуемого течения является изменение уровня рабочей жидкости в верхних баках. В условиях эксперимента максимальное изменение уровня жидкости не превышало 100 мм (0,1 м). В то же время полный перепад высот, обеспечивающий течение жидкости, составлял не менее 1 м. Максимальное изменение уровня жидкости относительно среднего значения было  $\pm 5\%$  от перепада давления.

В связи с тем, что расход жидкости в трубопроводах ограничивался регулирующими вентилями, расход жидкости был пропорционален квадратному корню из перепада давления (аналогично зависимости расхода от перепада на расходомерной диафрагме). В связи с этим в условиях эксперимента максимальное отклонение мгновенного расхода от среднего значения не превышало  $\pm 2,5\%$ .

Изучению переходного процесса были посвящены отдельные экспериментальные и расчетные исследования. Выход течения на такой режим, фиксируемый измерением температуры потоков жидкости и их расходом, происходит через  $3 \div 5$  с. Время измерений в стационарном режиме течения составляет  $20 \div 40$  с, в зависимости от расходов потоков. Данные о времени выхода на стационарный режим подтверждаются термопарными измерениями в ядре потока. Подобное время выхода на стационарный режим было получено при расчетах, выполненных с помощью кода CONV-3D в ИБРАЭ РАН.

### 5.1.6 Воспроизводимость эксперимента

Для оценки повторяемости измерений были проведены измерения распределения температуры стенки при помощи тепловизора. При одинаковых положениях контрольных вентилях был проведен цикл, состоящий из 9 экспериментов. Измеренные расходные параметры приведены в таблице 5. Записи движения поплавков в баках для всех проведенных экспериментов приведены на рисунке 127. При измерениях полей температуры изменение расходов носило линейный характер, дрейфа расходов не наблюдалось.

Термограммы и распределение температуры поверхности стенки, в зависимости от расстояния от бокового подвода для девяти последовательных измерений, приведены на рисунках 128 - 130. Для разных случаев наблюдается хорошее соответствие. Разница температур не превышала  $\pm 5\%$ . При выходе установки на рабочий режим наблюдалась хорошая повторяемость расходных характеристик потоков и температурных параметров в измеряемой области.

Таблица 7 – Параметры проведенных экспериментов

| № Эксперимента | $Q_{\text{хол}}, \text{ Г/с}$ | $Q_{\text{гор}}, \text{ Г/с}$ | $Q_{\text{гор}}/Q_{\text{хол}}$ |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 1              | 866,1                         | 393,2                         | 0,45                            |
| 2              | 850,2                         | 391,6                         | 0,46                            |
| 3              | 868,8                         | 394,8                         | 0,45                            |
| 4              | 869,6                         | 393,9                         | 0,45                            |
| 5              | 874,6                         | 397,6                         | 0,45                            |
| 6              | 876,2                         | 406,2                         | 0,46                            |
| 7              | 871,9                         | 396,8                         | 0,45                            |
| 8              | 877,7                         | 394,1                         | 0,45                            |
| 9              | 859,9                         | 395,6                         | 0,46                            |

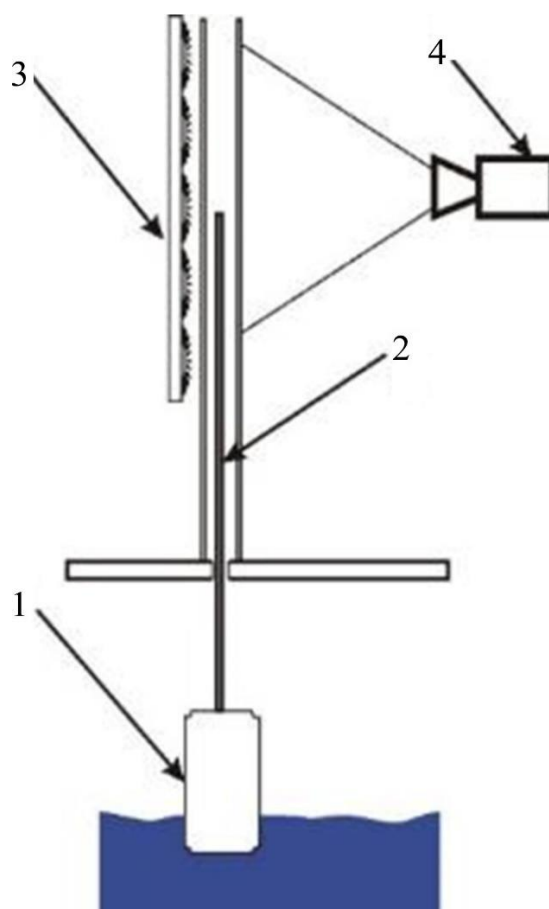


Рисунок 126 – Схема измерения уровня жидкости в баке: 1 – поплавок; 2 – уровень; 3 – светодиодная подсветка; 4 – камера.

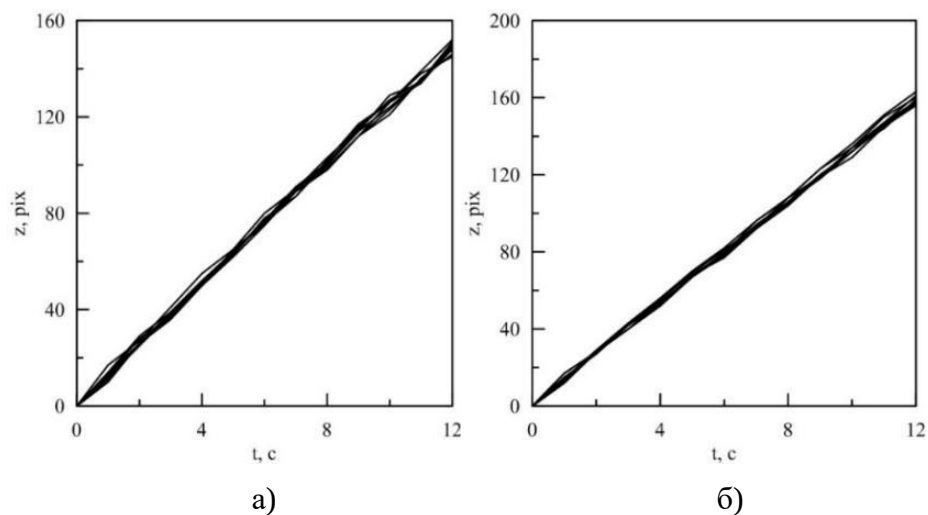


Рисунок 127 – Графики изменения уровней в баках «холодной» и «горячей» жидкостей для девяти последовательных экспериментов.

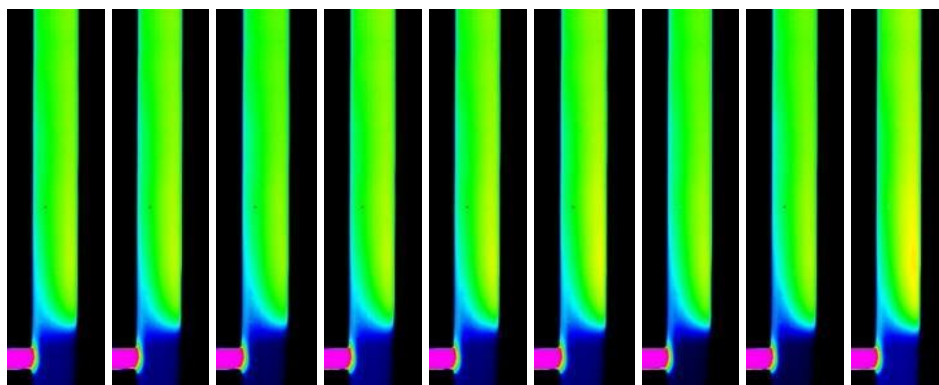


Рисунок 128 – Распределение осредненной температуры стенки для девяти последовательных экспериментов.

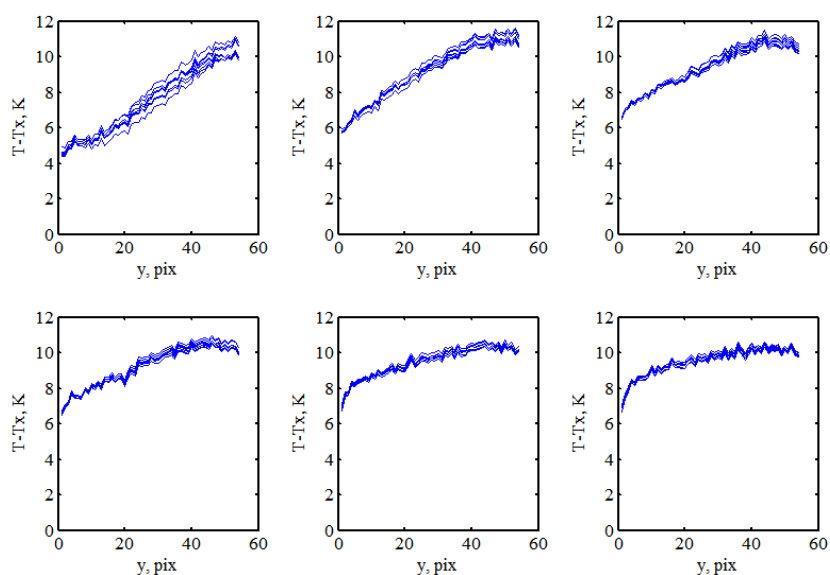


Рисунок 129 – Распределение температуры на поверхности стенки тройника на разных расстояниях от центра бокового подвода для девяти последовательных измерений: 1 –  $z = 25$  мм; 2 –  $z = 50$  мм; 3 –  $z = 75$  мм; 4 –  $z = 100$  мм; 5 –  $z = 125$  мм; 6 –  $z = 150$  мм.

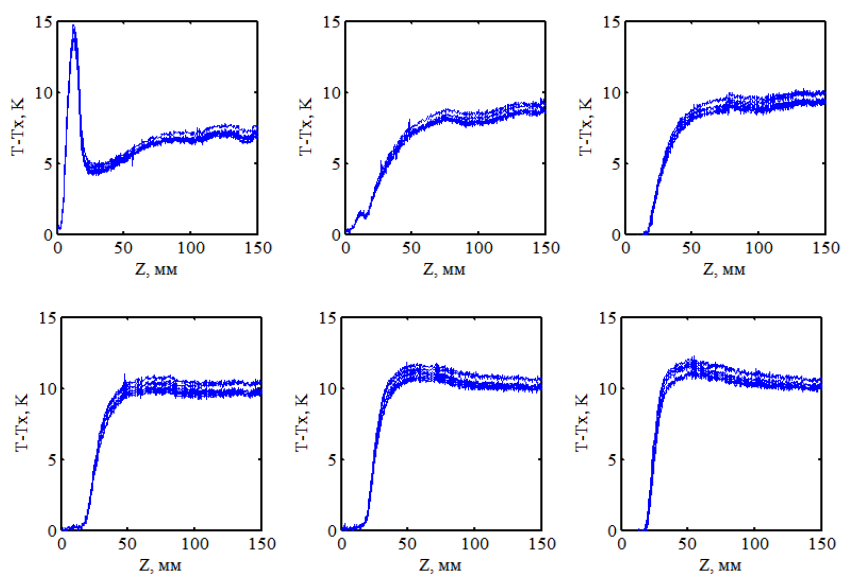


Рисунок 130 – Распределение температуры на поверхности стенки тройника для вертикальных линий.

#### Свойства рабочей жидкости и материала рабочего участка

Основные физические свойства сплава Розе в жидком состоянии в данном диапазоне температур приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Физические свойства сплава Розе в жидком состоянии

| Параметр                | Значение          | Единицы           |
|-------------------------|-------------------|-------------------|
| Плотность               | 9600              | кг/м <sup>3</sup> |
| Теплоемкость            | 0,2               | кДж/(кг·К)        |
| Теплопроводность        | 23,2              | Вт/(м·К)          |
| Кинематическая вязкость | $4 \cdot 10^{-7}$ | м <sup>2</sup> /с |

Основные физические свойства стали 12X18Н9Т (материал рабочего участка) приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Физические свойства стали 12X18Н9Т

| Параметр         | Значение | Единицы           |
|------------------|----------|-------------------|
| Плотность        | 7800     | кг/м <sup>3</sup> |
| Теплоемкость     | 0,50     | кДж/(кг·К)        |
| Теплопроводность | 16,5     | Вт/(м·К)          |

### **5.1.7 Распределение температуры при неизотермическом течении в тройниковом смесителе с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем**

На каждом из положений тепловизора было получено не менее 10000 кадров. Дальнейшая обработка и геометрическое преобразование полученных данных позволили получить картину распределения температуры по поверхности стенки. Расходные параметры, при которых производились измерения, сведены в таблицу 10.

Координата 0 град. соответствует центру трубы, через которую подводилась горячая жидкость, отсчет против часовой стрелки. Вертикальная координата  $z$  отсчитывалась от оси бокового подвода. Угловая координата  $\varphi$  отсчитывалась от центральной оси бокового подвода против часовой стрелки относительно оси симметрии основного канала.

Для экспериментов 1-3 можно провести сравнение для оценки влияния на поток расхода «холодной» жидкости при постоянном расходе «горячей» жидкости. Для эксперимента 1 отношение расходов 0,37. Скорость жидкости в горячем подводе достаточна для того, чтобы достигнуть противоположной стороны стенки трубы (см. рисунок 131 а). Вблизи этой стенки можно заметить увеличение температуры стенки по сравнению с остальной поверхностью трубы.

Наибольшие пульсации температуры наблюдаются в противоположной от расположения бокового подвода области трубы при  $Z = 10 \div 30$  мм. При отдалении от этой области наблюдается понижение пульсаций.

Увеличение отношения расходов приводит к увеличению температуры области стенки, с которой взаимодействует поток «горячей» жидкости (рисунки 131 б, в). При  $Z > 40$  мм на стенке смесителя выделяются две области с разными температурами и четко различимой границей. Наибольшие пульсации температуры стенки наблюдаются в области смешения потоков.

Эксперименты 3-5 позволяют определить влияние на поток расхода «горячей» жидкости при постоянном расходе «холодной» жидкости. Относительный расход для эксперимента 3 равен 0,44. Наблюдается взаимодействие потока «горячей» жидкости с противоположной областью стенки (см. рисунок 132 а). При увеличении  $Z$  происходит активное перемешивание и выравнивание температуры стенки. Область повышенных пульсаций температуры расположена в области, ограниченной  $Z$  от 10 до 30 мм, при  $\varphi$  от 90 до 180. Небольшая по площади область повышенных пульсаций находится в непосредственной близости от бокового подвода.

Для экспериментов с приблизительно равным относительным расходом (эксперименты 4 и 6) наблюдается похожая картина распределения температуры поверхности стенки и пульсаций температуры поверхности стенки.

Отношение расходов в эксперименте 5 мало и картина распределения температуры стенки и ее пульсаций примерно такая же, как у эксперимента 7. Отличием является более четко выраженные контуры температуры и пульсаций температуры стенки.

Для эксперимента 8 наблюдается равномерное распределение температуры стенки смесителя. И ярко выраженные пульсации температуры стенки вдоль фронта смешения потоков.

Наименьшее отношение расходов в эксперименте 9. Скорость потока горячей жидкости мала, и движение потока происходит вдоль стенки. Непосредственно выше по течению от расположения бокового подвода наблюдаются повышенные пульсации температуры стенки трубы.

Отличие вариантов заключается в том, что для более высокого расхода горячей жидкости происходит более интенсивное перемешивание и температурное поле быстро выравнивается с увеличением высоты.

На основе проведенных исследований проведена кросс-верификация современных средств вычислительной гидродинамики в рамках «слепого» теста в различных отечественных организациях атомной промышленности.

Таблица 10 – Расходные характеристики в проведенных экспериментах

| № Эксперимента | $Q_{\text{хол}}$ , Г/с | $Q_{\text{гор}}$ , Г/с | $Q_{\text{гор}}/Q_{\text{хол}}$ |
|----------------|------------------------|------------------------|---------------------------------|
| 1              | 814                    | 298                    | 0,37                            |
| 2              | 470                    | 298                    | 0,63                            |
| 3              | 678                    | 298                    | 0,44                            |
| 4              | 678                    | 199                    | 0,29                            |
| 5              | 678                    | 52                     | 0,077                           |
| 6              | 949                    | 298                    | 0,31                            |
| 7              | 1022                   | 58                     | 0,057                           |
| 8              | 814                    | 199                    | 0,24                            |
| 9              | 841                    | 18                     | 0,021                           |

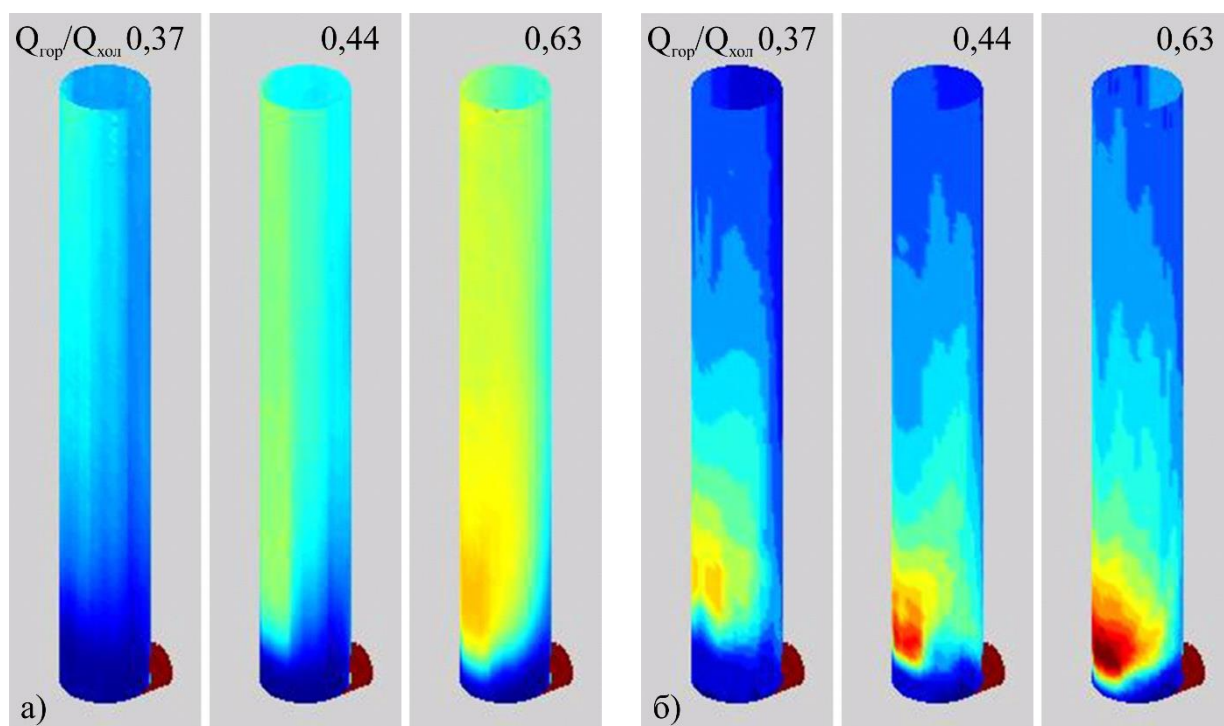


Рисунок 131 – Распределение температуры стенки при постоянном  $Q_{\text{гор}}$  (а), распределение пульсаций температуры стенки при постоянном  $Q_{\text{гор}}$  (б).

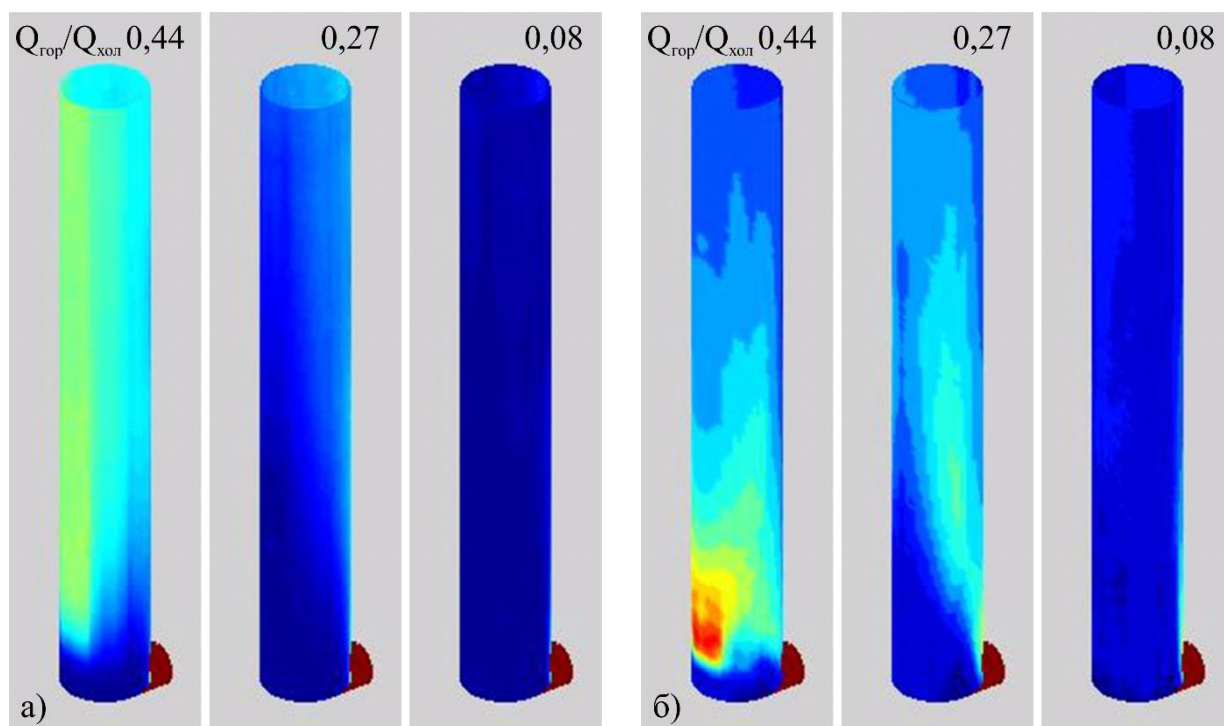


Рисунок 132 – Распределение температуры стенки при постоянном  $Q_{\text{хол}}$  (а), распределение пульсаций температуры стенки при постоянном  $Q_{\text{хол}}$  (б).

На рисунке 133 б,в приведены характерные профили температуры вдоль радиусов, соответствующих различным значениям окружного угла  $\gamma$  для Эксперимента 2. Координата  $y$  здесь соответствует расстоянию от стенки трубки. Обозначение линий, по которым перемещался датчик приведены на рисунке 133 а. Видно, что на небольшом расстоянии от места входа горячей жидкости структура температурного поля существенно не аксиально-симметрична. По мере увеличения расстояния от места начала смешения неравномерность температуры по сечению канала при разных значениях  $\gamma$  становится более плавной.

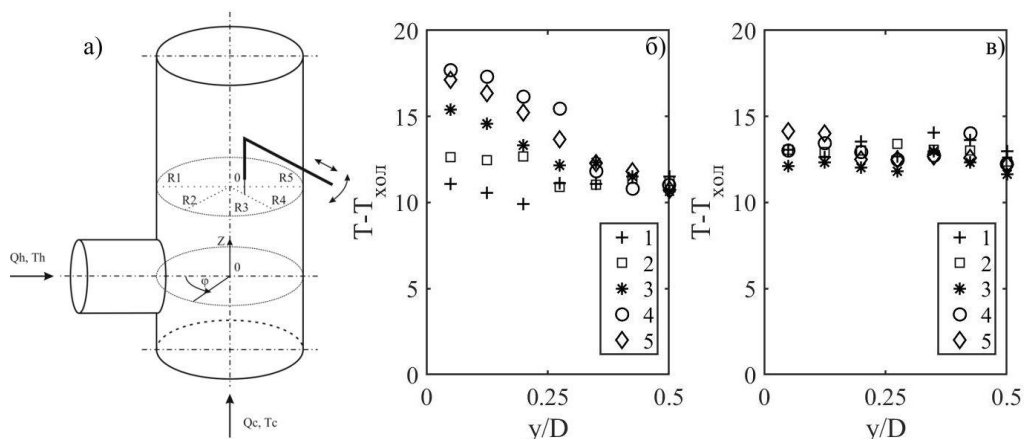


Рисунок 133 – Схема измерений (а); радиальные профили температуры:  $Z = 50$  (б),  $150$  (в) мм; R1-0 (1), R2-0 (2), R3-0 (3), R4-0 (4), R5-0 (5).

## 5.2 Распределение температуры при течении тяжелого жидкометаллического теплоносителя в тепловыделяющей сборке

### 5.2.1 Экспериментальная модель тепловыделяющей сборки с ТЖМТ

ТВС РУ БРЕСТ ОД-300 имеет гексагональную упаковку, в которой стержни размещаются в углах шестигранника. Наиболее приемлемым поперечным профилем модельной ТВС является форма, образованная сложением между собой  $n$  – шестигранных ячеек, где  $n$  – число стержней, плюс обечайка, сечение которой соответствует дополнительному поясу стержней (квазипериодическая сборка).

Стенд состоит из системы трубопроводов, рабочего участка, баков, насоса и измерительной аппаратуры. Для проведения экспериментов по изучению теплогидравлики течения ТЖМТ использовалась модельная жидкость – сплав Розе. Схема экспериментального стенда приведена на рисунке 134. Он позволяет проводить эксперименты при непрерывной прокачке теплоносителя в автоматизированном режиме. Сплав Розе изначально нагревается и плавится в основном баке 1, находящемся в нижнем уровне экспериментального стенда. После



разогрева сплава и перехода его в жидкое состояние в основном баке поддерживается постоянная температура. Для организации течения ТЖМТ в рабочем участке применяется центробежный насос 2. Для передачи момента от двигателя к насосу применяется ременная передача 3.

При начале эксперимента расплав модельного ТЖМТ при помощи насоса через подводящий трубопровод, доставляется в экспериментальную модель 4 (ЭМ). В максимально высокой точке экспериментального стенда находится компенсационный бак 7, в котором установлена мешалка 8. После начала нагнетания открывается вентиль 9, соединяющий компенсационный бак и нисходящую линию. После окончания выхода пузырей газа в компенсационный бак, вентиль закрывается. Расход расплава измеряется с помощью расходомера 10 и задается частотным преобразователем насоса и градуированным вентилем 11. Далее расплав поступает в основной бак. При циркуляции происходит нагрев одного из твэлов (схемы нагрева приведены ниже). Торцы нагреваемого твэла выведены за пределы ЭМ - 5. Ток нагрева подается через тоководы 6. Баки оборудованы измерителями температуры 13. Подводящий напорный патрубок подсоединен таким образом, что после окончания эксперимента весь расплав сливается из полостей ЭМ, подающей и сливной линий в бак. При проведении монтажных работ используются дренажные вентили 12.

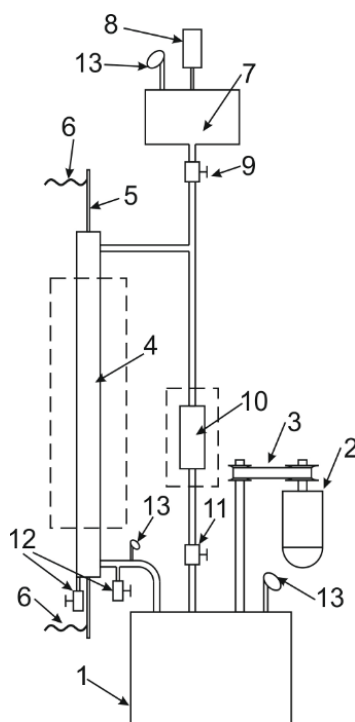
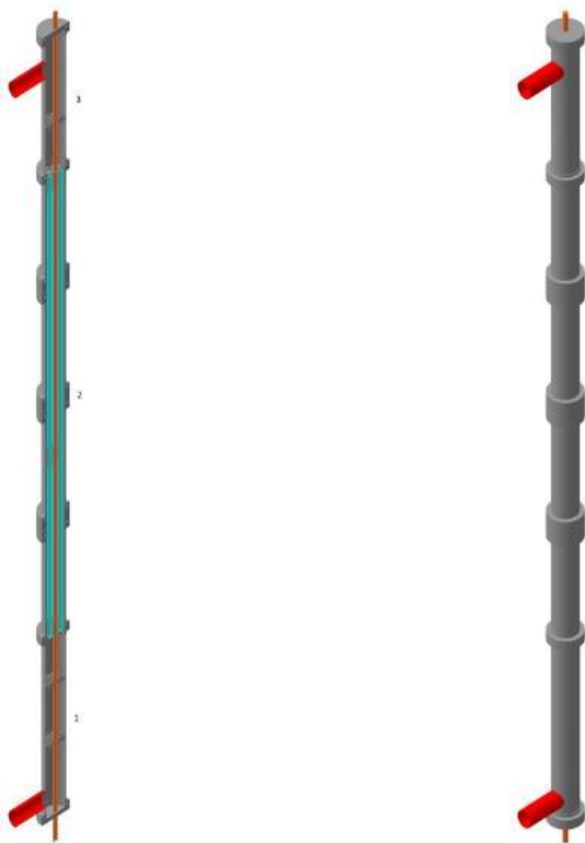


Рисунок 134 – Схема экспериментального стенда: 1 – бак с ТЖМТ; 2 – электродвигатель; 3 – привод насоса; 4 – рабочий участок; 5 – центральный имитатор твэла; 6 – управление перемещением имитатора твэла; 7 – верхний бак; 8 – привод мешалки; 9 – регулировочный вентиль; 10 – расходомер; 11 – регулировочный вентиль; 12 – дренажные вентили; 13 – измерители температуры.

Для исключения перепадов температуры вблизи стенок экспериментальной модели ТВС и, соответственно, тепловых потерь, рабочий участок помещен в бокс, через который непрерывно производится принудительная циркуляция горячего воздуха, температура которого соответствует температуре теплоносителя.

Подводящие к рабочему участку трубы сделаны из нержавеющей стали и снабжены системой термостабилизации, которая поддерживала температуру труб, равную температуре теплоносителя, поступающего в рабочий участок.

На рисунке 135 приведена 3D модель рабочего участка - вертикальной 7-стержневой модели – имитатора ТВС. Слева приведен продольный разрез, справа – изометрия. Он состоит из 4 секций, соединяемых между собой при помощи фланцев, а также входного и выходного коллекторов.



(а) – разрез

(б) – изометрия

Рисунок 135 – Схема экспериментальной модели.

Поперечное сечение обечайки изготовлено таким образом, что имитирует дополнительный пояс твэлов (см. рисунок 136 а). Диаметр стержней – имитаторов 9 мм, относительный шаг расположения стержней в пучке 1,4. Длина имитаторов твэлов 890 мм.

Имитаторы твэлов позиционируются в рабочем участке посредством 7-ми ячеистых элементов дистанционирующих решеток (см. рисунок 136 б). Толщина материала, из которого выполнены элементы ДР составляет  $\sigma_{\text{реш}} = 0,3$  мм,  $L_{\text{реш}} = 30$  мм. По высоте рабочего участка имеется 3 пояса позиционирования стержней.

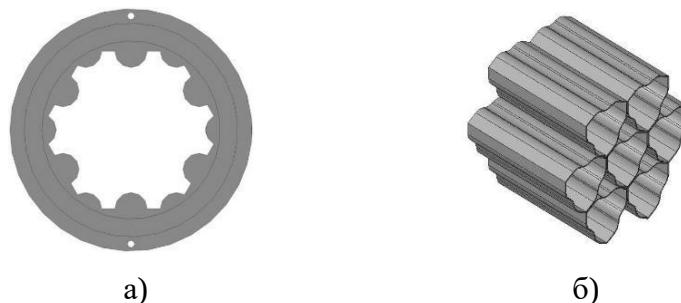


Рисунок 136 – Внешний вид обечайки рабочего участка (а) и дистанционирующей решетки (б).

Для выравнивания потока внизу рабочего участка установлены две дополнительные решетки (см. рисунок 137). Геометрия и установочные места выбраны по результатам моделирования входного течения CFD кодом Star CCM+. Для увеличения проходного сечения выполнены шестигранные отверстия с помощью гидроабразивной резки. Для свободного прохождения торцов нагреваемого твэла имелись отверстия с вписанной окружностью диаметром 9,5 мм. Высота решеток 10 мм, материал - нержавеющая сталь.

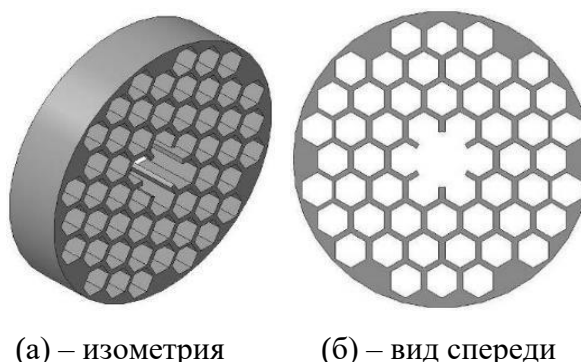


Рисунок 137 – Схема выравнивающей решетки.

Для создания тепловой неоднородности в одном из имитаторов твэла (центральный и/или периферийный, рисунки 138, 139) создается зона нагрева. Нагрев имитатора твэла осуществляется на локализованной области длиной 300 мм спиральным нагревателем, расположенным внутри имитатора твэла. Для уменьшения теплопотерь использовался хорошо проводящий электроизоляционный материал с финальной опрессовкой участка для создания хорошего теплового контакта и увеличения коэффициента теплопередачи от нагреваемого спирального элемента к поверхности имитатора твэла. Максимальная подводимая мощность к

нагреваемому элементу составляет до 1850 Вт. Измерения температурной неоднородности в ТВС, вызванной нагревом одного из стержней, выполняются на стенке соседнего имитатора твэла по азимутальной и осевой координатам.

Расположение элементов по вертикали приведено на рисунке 140. Нижняя ДР устанавливается заподлицо с гранями имитаторов твэлов. Выше решетки, через 25 мм, находится зона нагрева, после окончания которой имеется необогреваемая область длиной 25 мм и устанавливается следующая решетка. При измерениях "без решетки" она перемещается выше на позицию, указанную на рисунках 140 в, г. Измерения проводятся на расстоянии до 360 мм от верхнего края решетки. Область измерения приведена на рисунке в виде пунктирной рамки зеленого цвета. Измерения производятся с разной дискретностью в зависимости от расстояния до решетки (а значит и эффекта от ее присутствия), шаг измерений - 40 мм. Изменение азимутального угла варьируется в пределах  $0 \div 360$  градусов. Таким образом, существует возможность контролировать повторяемость эксперимента по повторяемости «нулевой» точки.

Таким образом, используется четыре разных конфигурации экспериментальной модели. Они обозначаются, как ТЖМТ\_7Т\_\*, согласно рисунку 140 (а-г).

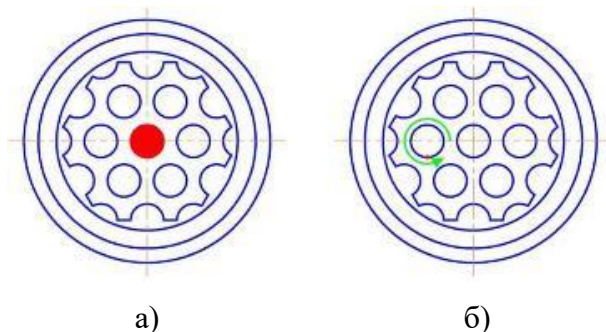


Рисунок 138 – Компонировка элементов при нагреве центрального имитатора твэла:  
а – расположение нагреваемого, б – расположение измерительного имитаторов твэлов.

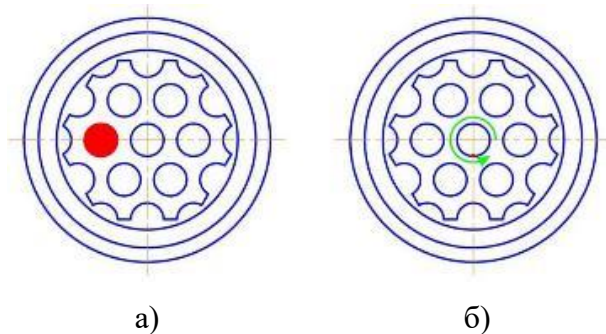


Рисунок 139 – Компонировка элементов при нагреве периферийного имитатора твэла:  
а – расположение нагреваемого, б – расположение измерительного имитаторов твэлов.

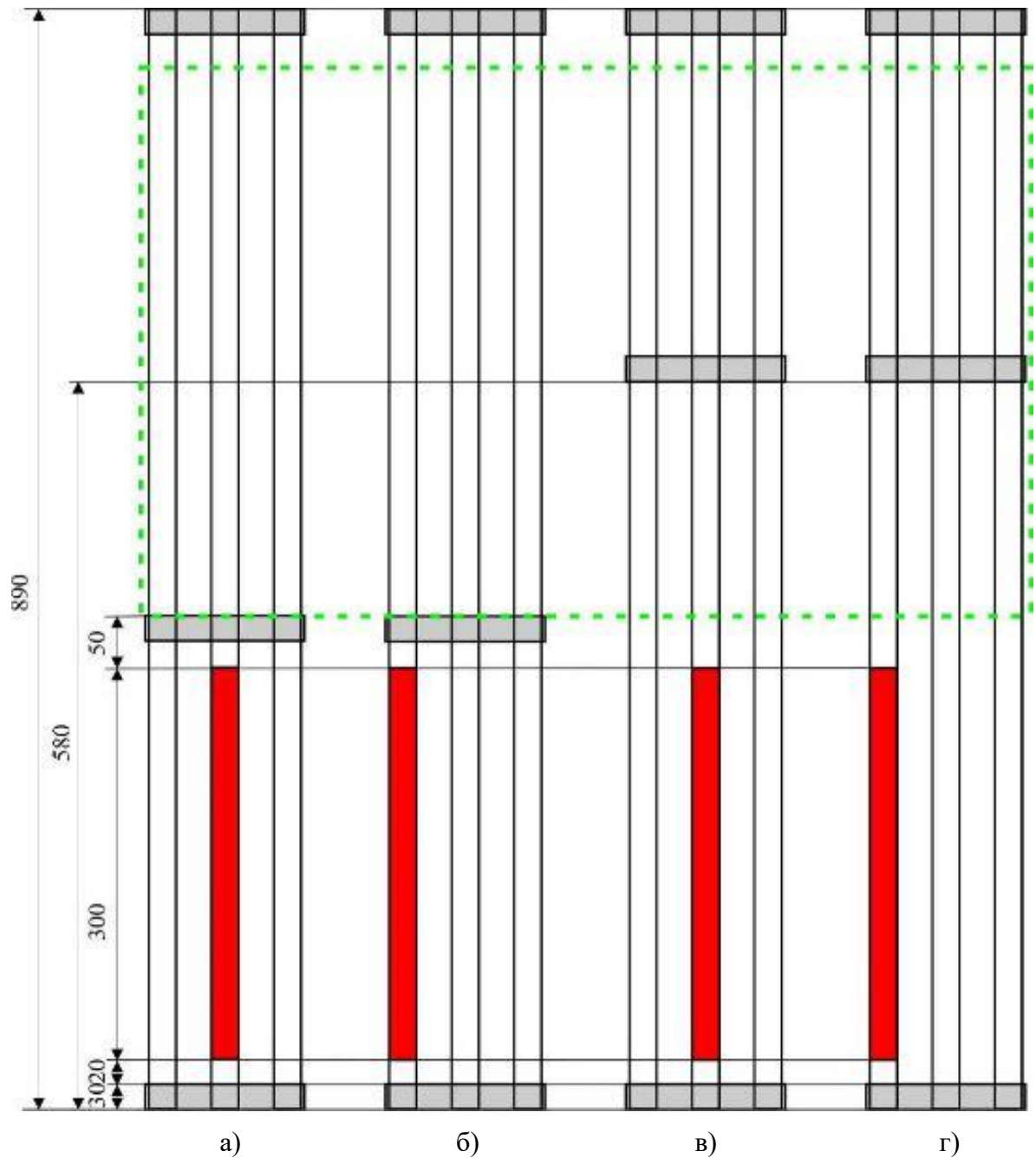


Рисунок 140 – Схема вертикальной компоновки элементов ТВС при проведении цикла измерений: а – эксперимент ТЖМТ\_7Т\_1; б – эксперимент ТЖМТ\_7Т\_2; в – эксперимент ТЖМТ\_7Т\_3; г – эксперимент ТЖМТ\_7Т\_4.

Были приняты следующие обозначения экспериментов:

- ТЖМТ\_7Т\_1 – течение ТЖМТ при тепловыделении на центральном стержне и измерениях температуры на периферийном стержне за ДР;
- ТЖМТ\_7Т\_2 - течение ТЖМТ при тепловыделении на периферийном стержне и измерениях температуры на центральном стержне за ДР;

— ТЖМТ\_7Т\_3 - течение ТЖМТ при тепловыделении на центральном стержне и измерениях температуры на периферийном стержне с учетом влияния ДР;

— ТЖМТ\_7Т\_4 - течение ТЖМТ при тепловыделении на периферийном стержне и измерениях температуры на центральном стержне с учетом влияния ДР.

Параметры течения теплоносителя и сводка основных размеров приведена в таблице 11.

Таблица 11 – Параметры течения теплоносителя

| Параметр                                | Значение   |
|-----------------------------------------|------------|
| <u>Имитатор твэла:</u>                  |            |
| диаметр                                 | 9,0 мм     |
| длина                                   | 890 мм     |
| длина нагреваемой части                 | 300 мм     |
| мощность нагрева                        | 1,85 кВт   |
| <u>Геометрия стержневой сборки:</u>     |            |
| количество стержней                     | 7          |
| шаг стержней                            | 1,4        |
| <u>Дистанционирующая решетка:</u>       |            |
| высота                                  | 30 мм      |
| толщина материала                       | 0,3 мм     |
| количество решеток                      | 3          |
| <u>Параметры течения теплоносителя:</u> |            |
| температура                             | 150÷170 °С |
| давление                                | 0,1 МПа    |
| число Прандтля                          | 0,03       |
| число Рейнольдса                        | до 10000   |

### 5.2.2 Процедура выполнения измерений

В начале эксперимента сплав Розе в твердом состоянии находился в основном баке. Для разогрева подключались два нагревателя, суммарной мощностью 4 кВт. По истечении 2.5÷3 часов со времени начала разогрева включалось питание системы термостабилизации подводящих трубопроводов, вентилях и рабочего участка. Общая мощность нагревателей около 3 кВт.

Каждый элемент подключен к многоканальной системе диагностики и управления. Всего использовалось более 20 каналов. Во время разогрева производилась проверка работы измерительных систем, поиск течей расплава в элементах контура.

Происходила прокачка ТЖМТ через рабочий участок - 7 стержневой имитатор ТВС. Через 5 секунд после начала прокачки включался нагрев периферийного или центрального имитатора твэла, в зависимости от условий проведения эксперимента. При необходимости изменялась мощность нагрева или расход теплоносителя. Для определения пространственного распределения температуры производилось позиционирование измерительного спая термопары по вертикальной и азимутальной координатам. Измерения каждой точки повторялись не менее 5 раз.

В течение всего времени после окончания начального этапа производилось непрерывное сохранение на жесткий диск компьютера с частотой 1 Гц следующих величин:

- температура в основном баке;
- температуры стенок каждого элемента системы трубопроводов, вентилях и рабочего участка.

Непосредственно при проведении экспериментов дополнительно производилась запись основных экспериментальных данных (частота сбора данных не менее 500 Гц):

- расход расплава;
- температура на входе и выходе рабочего участка;
- перепад температуры между входом в рабочий участок и измеряемой областью (дифференциальная термопара).

На выходе из рабочего участка осуществлялось охлаждение расплава до начальной температуры с помощью теплообменника.

### **5.2.3 Методы измерений**

Были использованы методы и устройства, описанные выше. Для измерений температур элементов стенда применяются термопары тип "К", подключенные к измерителям-регуляторам "ТРМ-138". Имитация "холодного" спая осуществлялось за счет схемотехники прибора.

Для измерения температур на поверхности имитатора твэла использовалась дифференциальная термопара тип "К". При этом холодный спай термопары находился в расплаве на входе в экспериментальную модель.

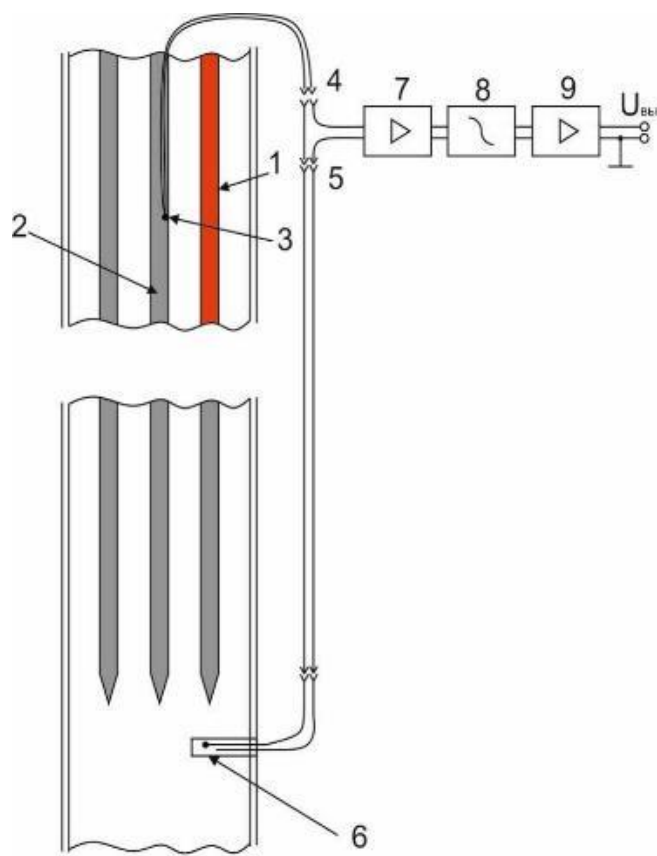


Рисунок 141 – Схема измерений с помощью дифференциальной термопары.

Для измерения температуры на входе в рабочий участок применялась дифференциальная термопара типа "К", холодный спай помещен в кипящую воду. Температура воды постоянно контролировалась с помощью терморезистивного датчика ДТС055-50М и записывалась на жесткий диск компьютера.

Для измерения температуры в различных точках стенда использовались термометры сопротивления и термопары. В баки с рабочей жидкостью помещались термометры ДТС055-50М, подключенные к измерителям – регуляторам микропроцессорным типа 2ТРМ-1-Д.У.РР. Точность поддержания температуры при таком способе регулировки  $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ . Для измерения расхода жидкости использовались оригинальные расходомеры, основанные на электромагнитном эффекте.

Измерение температуры имитатора твэла производилось термопарой, работающей в дифференциальном режиме. Схема измерений приведена на рисунке 141. Измерительный стержень представлял собой тонкостенную трубку 2 из нержавеющей стали, в отверстие в стенке которой был впаян спай термопары (горячий спай). Холодный спай термопары 3 помещался в подводящую трубу 6. Этот спай находился в металлическом кожухе и был электрически



изолирован от жидкости. Для обеспечения теплового контакта и уменьшения постоянной времени прогрева термопары использовался высокотеплопроводный компаунд. Термопара была изготовлена из термопарных проводов типа К (хромель – алюмель) производства фирмы OMEGA. Для коммутации термопарных проводов использовались термопарные коннекторы типа К (4 и 5). Выходной сигнал дифференциальной термопары подавался на вход усилителя. Коэффициент усиления этого усилителя равнялся 1000. С выхода усилителя сигнал подавался на фильтр 7, который ослаблял высокочастотный шум, вызванный электрическими наводками. Далее сигнал подавался на дополнительный усилитель 9, выходное напряжение которого подавалось на АЦП. Общий коэффициент усиления системы составлял 5000.

#### **5.2.4 Калибровка и неопределенности измерений расхода и температуры**

В процессе эксперимента происходила непрерывная циркуляция рабочей жидкости в контуре. Для измерения расхода применялись электромагнитные расходомеры.

Суть метода калибровки расходомера заключается в контроле напряжения на выходе системы измерения скорости расплава при движении жидкости с известным расходом. Метод применялся непосредственно на установке. Таким образом исключалось влияние на результаты экспериментов температурного режима, расположения измерительных элементов относительно предполагаемых источников помех и т.д. В ходе проведения первичных измерений производилась подстройка постоянного сдвига выходного сигнала измерительной системы для выполнения условия "0" при нулевом расходе жидкости, что снижает систематическую погрешность измерения. Расплав из основного бака закачивался в верхний бак, оснащенный термометром, перемешивающим устройством и поплавковым расходомером. Затем открывался контрольный вентиль и начиналось истечение расплава через нисходящую трубу, оснащенную расходомером. При этом производился контроль положения штока поплавкового расходомера в режиме реального времени и запись его положения на видеокамеру.

Одновременно производилась запись сигнала расходомера с помощью АЦП на жесткий диск персонального компьютера. Калибровка расходомера производилась с помощью анализа данных видеорегистрации и сигнала на выходе расходомера. Для того, чтобы избежать влияния процесса установления потока в трубе, некоторое время после начала истечения анализ раскадровки данных не производился. Масса расплава при проведении испытаний находилась в пределах  $150 \div 180$  кг. При проведении калибровочных экспериментов минимальное изменение уровня жидкости в исследуемых режимах составляло 100 мм. Начальное и конечное положение поплавка регистрировалось с точностью не хуже 0,5 мм.

Испытания производились при разных массовых расходах расплава через расходомер. Результатом испытаний является определение коэффициента пропорциональности массового расхода теплоносителя. Для расходов, необходимых для проведения измерений в рамках проведенных исследований, зависимость имеет линейный вид (см. рисунок 142). Показана оценка неопределенности определения расхода, она находилась в пределах  $\pm 2,5\%$ .

Для проведения испытаний измерительной термопары и настройки усилителя производились контрольные испытания. Измерительная термопара и "холодный" спай были помещены в теплоизолированные сосуды с известной температурой, контроль которой обеспечивался с помощью термометров сопротивления ДТС035-100П. Равномерность температуры в сосудах обеспечивалась с помощью механического перемешивания. Температура сосуда, в котором находился «холодный» спай, составляла  $100^{\circ}\text{C}$ . Температура во втором сосуде изменялась путем подмешивания сплава с другой температурой из нагретого источника. Измерения проводились после установления в сосудах постоянной температуры.

Результаты калибровки приведены на рисунке 143. Для сравнения приведена линейная аппроксимация данных (черная линия). Наблюдается хорошая повторяемость данных, отклонения от линейной зависимости минимальные. Предельные отклонения обозначены на графике с помощью синей ( $T-0,25^{\circ}\text{C}$ ) и красной ( $T+0,25^{\circ}\text{C}$ ) линий. Все поверенные варианты температуры находятся в допустимом диапазоне (между красной и синей линиями). Таким образом, можно принять неопределенность определения температуры с помощью дифференциальной термопары для применявшейся в тестах системы измерений  $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ .

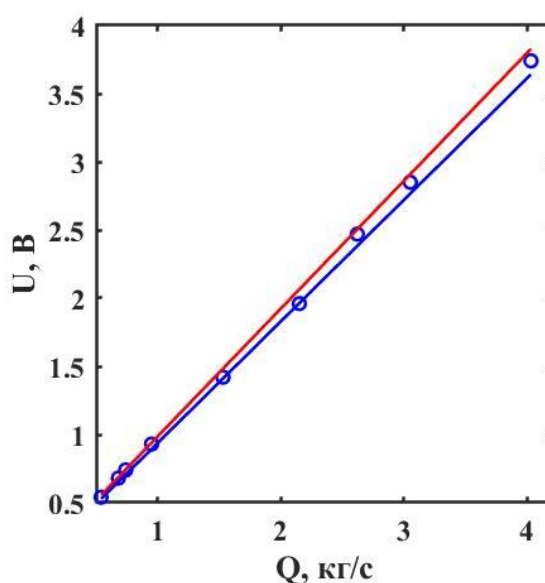


Рисунок 142 – Калибровочная зависимость расходомера.

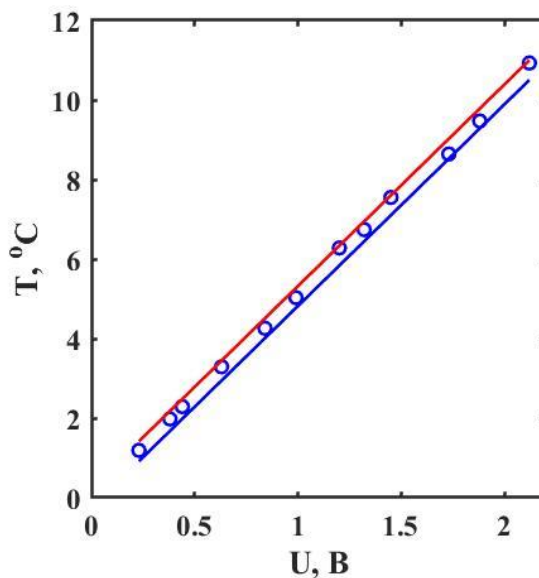


Рисунок 143 – Калибровочная зависимость для дифференциальной термопары.

### 5.2.5 Распределение температуры при течении тяжелого жидкометаллического теплоносителя в тепловыделяющей сборке с неравномерным энерговыделением

Проведены экспериментальные исследования, включающие нижеперечисленные пункты:

- экспериментальное исследование распределения температуры по поверхности стенки имитатора твэла при течении модельного ТМЖТ через 7-ми стержневую модель ТВС при нагреве периферийного имитатора твэла;
- экспериментальное исследование распределения температуры по поверхности стенки имитатора твэла при течении модельного ТЖМТ через 7-ми стержневую модель ТВС при нагреве центрального имитатора твэла;
- исследование пространственной эволюции температурного поля на поверхности соседнего с нагреваемым имитатора твэла;
- экспериментальное исследование влияния дистанционирующей решетки на распределение температурного поля на поверхности имитатора твэла;

На рисунках 144 а-г приведены данные о распределении температуры поверхности соседнего с нагреваемым имитатора твэла. Эксперименты проводились в соответствии со схемами, приведенными на рисунке 140.

Результаты экспериментов приведены в виде полей, построенных по азимутальной и вертикальной координатам. Позиция  $Z=0$  соответствует расположению верхнего края дистанционирующей решетки. Азимутальный угол  $180$  градусов соответствует точке, в которой расстояние от измерительной точки до поверхности имитатора твэла с обогреваемым участком минимально. Для оценки дрейфа температуры данные о ее распределении приведены в виде зависимости  $dT/dT_{\text{макс}}$ , где  $dT$  - разница между температурой в измеряемой точке и температурой на входе в экспериментальную модель,  $dT_{\text{макс}}$  - максимальная температура, зарегистрированная в эксперименте. Эксперименты производились при непрерывной циркуляции ТЖМТ через сборку. Число Рейнольдса течения во время проведения экспериментов равнялось  $8000$ .

Для эксперимента ТЖМТ\_7Т\_1 (см. рисунок 144 а) решетка находится практически сразу за окончанием нагреваемой области. По всей видимости, ее наличие приводит к перераспределению температуры в потоке, что приводит к постепенному уменьшению температуры стенки при удалении от области нагрева. При этом пятно нагрева немного расширяется при увеличении  $Z$ . Нагрев противоположной от нагреваемой стенки области измерительного имитатора твэла выражен слабо.

Для эксперимента ТЖМТ\_7Т\_2 (см. рисунок 144 б) можно отметить подобную тенденцию распределения температуры. Как и в предыдущем эксперименте, при удалении от области нагрева, а соответственно и от ДР, наблюдается некоторое снижение максимальной температуры стенки по окружности стержня и расширение теплового пятна. Перенос температуры в сторону противоположной стороны стенки выражен слабо.

При перемещении решетки на более высокую позицию наблюдается отличие картины распределения температуры. Данные эксперимента ТЖМТ\_7Т\_3 приведены на рисунке 144 в. При увеличении  $Z$  наблюдается рост температуры, что вероятно вызвано перераспределением температуры в межтвэльном пространстве. После взаимодействия с решеткой, которая расположена на позиции между  $Z = 160 \div 200$  мм, наблюдается картина, аналогичная предыдущим экспериментам, т.е. максимум температуры в эпюрах начинает снижаться с увеличением расстояния от нагреваемой области. По всей видимости, это связано с перераспределением температуры в межтвэльном пространстве.

Для эксперимента ТЖМТ\_7Т\_4 (см. рисунок 144 г) наблюдается похожая картина. Как и в предыдущем случае, при проведении измерений между  $Z=0$  мм и местом установки решетки наблюдается рост температуры, т.е. идет продолжение тенденции, наблюдаемой при измерениях вдоль нагреваемого твэла. После взаимодействия с решеткой температурное пятно на стенке

изменяется и максимальная температура его падает. Это вызвано перераспределением температуры при взаимодействии потока с решеткой.

Можно выделить слабый перенос температуры на противоположную сторону измерительного имитатора твэла. Разница температуры в области, соответствующей расположению обогреваемого твэла, и температуры противоположной стенки, достигают значительных величин. При этом при изменении  $Z$  тенденция меняется незначительно.

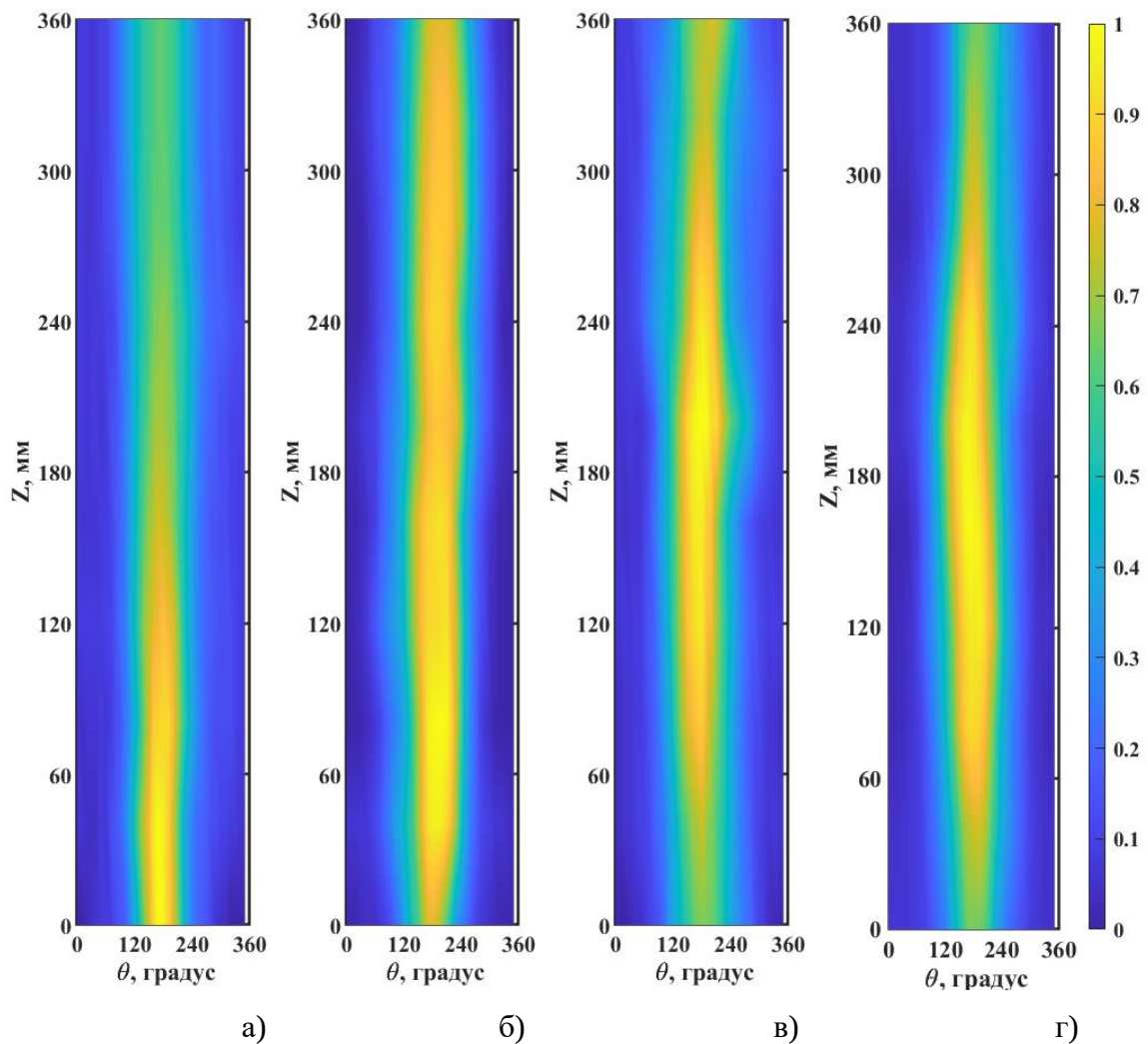


Рисунок 144 – Результаты экспериментальных исследований течения ТЖМТ при неравномерном энерговыделении: а – ТЖМТ\_7Т\_1; б – ТЖМТ\_7Т\_2; в – ТЖМТ\_7Т\_3; г – ТЖМТ\_7Т\_4.

### 5.3 Выводы

Исследование неизотермических течений тяжелого жидкометаллического теплоносителя, моделирующих потоки в соединениях трубопроводов или ячейках тепловыделяющих сборок в случае неравномерного тепловыделения ТВЭЛОВ, позволило получить следующие результаты:

- впервые проведены экспериментальные исследования процесса смешения разнотемпературных потоков ТЖМТ, которые позволили выявить степень влияния расходов потоков с разной температурой на трехмерный характер течений, получена база экспериментальных данных, включающая в себя распределение локальных осредненных и пульсационных характеристик течения, выявлены области, наиболее подверженные термоциклическим усталостным эффектам;

- в результате проведения экспериментальных исследований в ячейках семистержневой экспериментальной модели тепловыделяющей сборки с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем определено влияние расположения дополнительно обогреваемого имитатора ТВЭЛА (центральный, периферийный) и дистанционирующей решетки на распределение температуры стенки соседнего имитатора ТВЭЛА.

Результаты по закономерностям локальных течений в ТВС, перемешиванию потоков модельного тяжелого жидкометаллического теплоносителя с разной температурой использованы для верификации отечественного расчётного CFD кода CONV-3D (LES и DNS).

## Заключение

Получен ряд новых приоритетных данных по локальному теплообмену и гидродинамике теплоносителей в элементах реакторных установок с водяным и тяжелым жидкометаллическим теплоносителями, уточняющих физические модели течения теплоносителей и расчетные соотношения, обосновывающих проектные решения и существенно расширяющие матрицы верификации расчетных кодов в части данных о локальных осредненных, пульсационных тепловых и гидродинамических параметрах течений, в том числе спектральных характеристик;

Выполнены детализированные измерения параметров течения в 7-ми и 37-ми стержневых моделях ТВС ВВЭР, впервые показывающие локальное влияние ДР на возмущения распределения напряжения трения по периметру имитатора ТВЭЛ в зависимости от изменения диаметра имитаторов ТВЭЛ, относительного шага расположения стержней, числа стержней, распределения газовой фазы между ячейками, осевой скорости течения и влиянию ДР на теплообмен при одно и двухфазном течении. Установлено, что наличие ДР приводит к локальной интенсификации теплообмена, азимутальной неравномерности распределения гидродинамических характеристик потока (скорость, касательные напряжения), дроблению крупных пузырей. Установлено, что структура потока практически полностью восстанавливается на расстоянии  $5 \div 8$  калибров от ДР, подобным образом ведет себя зависимость коэффициента теплообмена.

По результатам локальных измерений гидродинамических параметров и теплообмена при одно- и двухфазных течениях в 7-ми и 37-ми стержневых моделях ТВС РУ ВВЭР с дистанционирующими решетками разной конструкции получены приоритетные результаты по теплофизическому обоснованию новых типов тепловыделяющих сборок ЯЭУ с водяным теплоносителем. В частности, впервые проведены исследования распределения напряжения трения на стенке и его пульсаций по периметру имитатора ТВЭЛ в модели РУ АЭС 2006, распределения локальной скорости теплоносителя и ее пульсаций в межТВЭльном пространстве, параметрах движения двухфазного течения теплоносителя в ТВС, таких как скорость пузырей, их распределение по размерам, локальное газосодержание; показано влияние дисперсной фазы на теплообмен между имитатором ТВЭЛ и теплоносителем.

Экспериментально получены новые закономерности двухфазных течений, возникающих в элементах реакторных установок, в частности, локальном изменении структуры нисходящих пузырьковых течений, течений за преградой, течений с внезапным расширением. Впервые выявлены и исследованы режимы течения нисходящего пузырькового потока с подавлением теплообмена, показано, что добавление даже малых количеств газа в поток приводит к

существенному изменению интегральных, пульсационных и спектральных параметров. Впервые показано, что взаимодействие крупномасштабных вихревых структур в отрывном пузырьковом потоке не приводит к существенной интенсификации теплообмена, которая наблюдается в области восстановления течения. Показан процесс перехода пузырей за преградой от центральной к пристеночной области течения.

Выполнено моделирование локальных течений при взаимодействии газовой фазы с ТЖМТ, определены закономерности формирования, эволюции формы и скорости движения газовых пузырей, их влияния на «захолаживание» теплоносителя. Впервые получены экспериментальные данные о «взрывном» истечении газа высокого давления в ТЖМТ, обосновывающие изменения давления и свободного уровня теплоносителя в канале. Показано, что «взрывное» истечение газа вызывает интенсивные колебания уровня ТЖМТ, возникающие при этом пульсации давления могут превышать начальное давление в канале. Результаты по «захолаживанию» тяжелого жидкометаллического теплоносителя и эволюции газовых пузырей использованы для уточнения расчетных моделей и верификации системного теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM.

Впервые, на примере Т-образного соединения трубопроводов, проведено экспериментальное моделирование смешения двух потоков тяжелого жидкометаллического теплоносителя с разной температурой для турбулентного режима течения. Получены детальные данные по распределению осреднённых и пульсационных значений температур в зоне смешения в объеме ТЖМТ и на внешней стенке тройникового смесителя в зависимости от соотношения расходов «холодного» и «горячего» теплоносителя. В результате измерений обнаружена значительная неравномерность распределения температуры стенки и жидкости в зоне смешения. Установлено, что наибольший уровень пульсаций температуры наблюдается на границе взаимодействия потоков, структура температурного поля в зоне смешения и на поверхности канала существенно зависит от соотношения расходов разнотемпературных потоков. Результаты по закономерностям перемешивания потоков ТЖМТ с разной температурой использованы для верификации CFD кодов.



### Список условных обозначений и сокращений

|                   |                                                                                             |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A_{\text{реш}}$  | – Площадь проекции дистанционирующей решетки, $\text{м}^2$                                  |
| $A_{\text{кан}}$  | – Не затененная площадь проходного сечения канала, $\text{м}^2$                             |
| $C_0$             | – Коэффициент                                                                               |
| $C_1$             | – Коэффициент                                                                               |
| $d_{\text{п}}$    | – Диаметр пузыря, м                                                                         |
| $D$               | – Диаметр трубы, стержня, м                                                                 |
| $D_{\text{вн}}$   | – Внутренний диаметр кольцевого канала, м                                                   |
| $D_{\text{г}}$    | – Гидравлический диаметр, м                                                                 |
| $D_{\text{внеш}}$ | – Внешний диаметр кольцевого канала, м                                                      |
| $g$               | – Ускорение свободного падения, $\text{м/с}^2$                                              |
| $h$               | – Коэффициент теплообмена, $\text{Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$                          |
| $h_0$             | – Коэффициент теплообмена в потоке без модификации, $\text{Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| $H$               | – Высота, уровень, м                                                                        |
| $I$               | – Ток, А                                                                                    |
| $\text{Int}$      | – Перемежаемость                                                                            |
| $K$               | – Коэффициент для гексагональной сборки стержней                                            |
| $K_{\text{реш}}$  | – Коэффициент сопротивления дистанционирующей решетки                                       |
| $L$               | – Длина, расстояние, м                                                                      |
| $L_{\text{п}}$    | – Длина хорды пузыря, м                                                                     |
| $L_{\text{реш}}$  | – Высота дистанционирующей решетки, м                                                       |
| $N$               | – Количество                                                                                |
| $P, \Delta P$     | – Давление, перепад давления, Па                                                            |
| $P_0$             | – Давление в начальный момент времени, Па                                                   |
| $Q$               | – Тепловой поток, $\text{Вт/м}^2$                                                           |
| $Q_{\text{г}}$    | – Расход газа, $\text{м}^3/\text{с}$                                                        |
| $Q_{\text{гор}}$  | – Расход горячей жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$                                            |
| $Q_{\text{хол}}$  | – Расход холодной жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$                                           |
| $R$               | – Радиальная координата, мм                                                                 |
| $r_1$             | – Внутренний радиус трубы, м                                                                |
| $r_2$             | – Внешний диаметр трубы, м                                                                  |
| $R$               | – Радиус, м                                                                                 |
| $S$               | – Расстояние между стержнями, м                                                             |

|                          |                                                              |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------|
| $t$                      | – Время, с                                                   |
| $t_{\text{инж}}$         | – Время впрыска газа, с                                      |
| $T$                      | – Температура, °C                                            |
| $T_{\text{гор}}$         | – Температура горячей жидкости, °C                           |
| $T_{\text{ж}}$           | – Температура жидкости, °C                                   |
| $T_{\text{хол}}$         | – Температура холодной жидкости, °C                          |
| $T_{\text{ст1}}$         | – Температура внутренней стенки, °C                          |
| $T_{\text{ст2}}$         | – Температура внешней стенки, °C                             |
| $T'$                     | – Пульсации температуры, °C                                  |
| $u$                      | – Локальная скорость жидкости (вертикальная компонента), м/с |
| $u'$                     | – Пульсации скорости жидкости, м/с                           |
| $U_0$                    | – Скорость всплытия пузыря Тейлора, м/с                      |
| $U_{\Pi}$                | – Скорость движения пузыря в потоке, м/с                     |
| $V_{\text{гж}}$          | – Скорость газожидкостной смеси, м/с                         |
| $V_{\text{ж}}$           | – Скорость жидкости, м/с                                     |
| $V^*$                    | – Динамическая скорость                                      |
| $V_{\infty}$             | – Скорость всплытия пузырей в неподвижной жидкости, м/с      |
| $Y$                      | – Расстояние от стенки, м                                    |
| $Y_1$                    | – Длина области измерений, м                                 |
| $Y_2$                    | – Длина области измерений, м                                 |
| $X$                      | – Расстояние от носика снаряда, м                            |
| $Z$                      | – Вертикальная координата, м                                 |
| $\Delta T$               | – Разница температур, °C                                     |
| $\Delta T_{\text{макс}}$ | – Максимальная разница температур, °C                        |
|                          |                                                              |
| АЭС                      | – Атомная электростанция                                     |
| АЦП                      | – Аналого-цифровой преобразователь                           |
| ВВЭР                     | – Водо-водяной энергетический реактор                        |
| ДПР                      | – Дистанционирующая перемешивающая решетка                   |
| ДР                       | – Дистанционирующая решетка                                  |
| ЖМТ                      | – Жидкометаллический теплоноситель                           |
| КГС                      | – Коэффициент гидравлического сопротивления                  |
| ЛДИС                     | – Лазерный доплеровский измеритель скорости                  |

|               |                                                              |
|---------------|--------------------------------------------------------------|
| ЛИФ           | – Лазерно-индуцированная флуоресценция                       |
| МПД           | – Модель потока дрейфа                                       |
| МСЗ           | – Международная стандартная задача                           |
| ОБ            | – Основной бак                                               |
| ПГ            | – Парогенератор                                              |
| ПН            | – Проволочная навивка                                        |
| ПР            | – Перемешивающая решетка                                     |
| ПРВ           | – Плотность распределения вероятности                        |
| РН            | – Рейнольдсовы напряжения                                    |
| ТВС           | – Тепловыделяющая сборка                                     |
| ТЖМТ          | – Тяжелый жидкометаллический теплоноситель                   |
| ТКЭ           | – Турбулентная кинетическая энергия                          |
| ЯЭУ           | – Ядерные энергетические установки                           |
| CFD           | – Вычислительная гидродинамика                               |
| CMFD          | – Вычислительная гидродинамика многофазных потоков           |
| DNS           | – Прямое численное моделирование                             |
| LBE           | – Эвтектический сплав свинец-висмут                          |
| PIV           | – Цифровая трассерная анемометрия                            |
| PFBI          | – Планарная флуоресцентная визуализация пузырей              |
| PLIF          | – Планарная лазерно-индуцированная флуоресценция             |
| RANS          | – Уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу          |
| $\alpha$      | – Локальное газосодержание                                   |
| $\beta$       | – Расходное газосодержание                                   |
| $\varepsilon$ | – Относительные пульсации трения                             |
| $\epsilon$    | – Относительное перекрытие потока дистанционирующей решеткой |
| $\gamma$      | – Азимутальный угол, градус                                  |
| $\varphi$     | – Азимутальный угол, градус                                  |
| $\rho$        | – Плотность, кг/м <sup>3</sup>                               |
| $\tau$        | – Мгновенное значение напряжения трения на стенке, Па        |
| $\tau_w$      | – Напряжение трения на стенке, Па                            |
| $\tau'$       | – Пульсации напряжения трения на стенке, Па                  |

|                       |                                                                     |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------|
| $\sigma$              | – Толщина пленки, мм                                                |
| $\sigma_{\text{реш}}$ | – Толщина материала дистанционирующей решетки, мм                   |
| $\xi$                 | – Коэффициент гидравлического сопротивления                         |
| $\lambda$             | – Теплопроводность, Вт/м°С                                          |
| $\lambda_{\text{ст}}$ | – Теплопроводность стенки, Вт/м°С                                   |
| $\lambda_{\Gamma}$    | – Коэффициент гидравлического сопротивления пучка стержней          |
| $\lambda_{\text{п}}$  | – Коэффициент гидравлического сопротивления плотного пучка стержней |
| $\theta$              | – Угловая координата, градус                                        |
| $\Omega$              | – Электрическое сопротивление, Ом                                   |
| $Nu$                  | – Число Нуссельта                                                   |
| $Pe$                  | – Число Пекле                                                       |
| $Pr$                  | – Число Прандтля                                                    |
| $Re$                  | – Число Рейнольдса                                                  |

## Список литературы

1. Experiments and unsteady CFD-calculations of thermal mixing in a T-junction / J. Westin, M. Henriksson, F. Alavyoon, [et al.] // Proceedings of the workshop on Benchmarking of CFD Codes for Application to Nuclear Reactor Safety (CFD4NRS). – 2007.
2. Investigations on mixing phenomena in single-phase flow in a T-junction geometry / C. Walker, M. Simiano, R. Zboray, [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2009. – Vol. 239. – № 1. – P. 116-126.
3. Chang, S.-K. Turbulent mixing in a rod bundle with vaned spacer grids: OECD/NEA–KAERI CFD benchmark exercise test / S.-K. Chang, S. Kim, C.-H. Song // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – Vol. 279. – Turbulent mixing in a rod bundle with vaned spacer grids. – P. 19-36.
4. Dynamic measurements of the flow and structure oscillations to validate FSI calculations / M.A. Bolshukhin, A.V. Budnikov, E.I. Shmelev, [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2021. – Vol. 381. – P. 111336.
5. Субботин, В.И. Гидравлические сопротивления при продольном обтекании пучков стержней / В.И. Субботин, П.А. Ушаков, Б.Н. Габрианович // Атомная энергия. – 1960. – Т. 9. – № 4. – С. 308-310.
6. Palmer, L.D. Measurements of heat-transfer coefficients, friction factors, and velocity profiles for air flowing parallel to closely spaced rods / L.D. Palmer, L.L. Swanson. – General Dynamics Corp., San Diego, CA (United States). General Atomic Div., 1961.
7. Heat exchange during the flow of mercury and water in a tightly packed rod pile / V.I. Subbotin, P.A. Ushakov, B.N. Gabrianovich, [et al.] // The Soviet Journal of Atomic Energy. – 1961. – Vol. 9. – № 6. – P. 1001-1009.
8. Levchenko, Yu.D. The distribution of coolant velocities and wall stresses in closely packed rods / Yu.D. Levchenko, V.I. Subbotin, P.A. Ushakov // Soviet Atomic Energy. – 1967. – Vol. 22. – № 3. – P. 262-269.
9. Calculation of the tangential stresses at the wall of a channel and the velocity distribution in a turbulent flow of liquid / M.Kh. Ibragimov, I.A. Isupov, L.L. Kobzar', [et al.] // Soviet Atomic Energy. – 1966. – Vol. 21. – № 2. – P. 731-739.
10. Eifler, W. Experimental investigation of velocity distribution and flow resistance in a triangular array of parallel rods / W. Eifler, R. Nijsing // Nuclear Engineering and Design. – 1967. – Vol. 5. – № 1. – P. 22-42.

11. Studies on fluid mixing between subchannels in a bundle of finned tubes / R. Nijsing, W. Eifler, B. Delfau, [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 1967. – Vol. 5. – № 3. – P. 229-254.
12. Measurement of heat transfer coefficients for axial air flow through eccentric annulus and seven-rod cluster / F. Tachibana, A. Oyama, M. Akiyama, [et al.] // Journal of Nuclear Science and Technology. – 1969. – Vol. 6. – № 4. – P. 207-214.
13. Borishanskii, V.M. Heat transfer to liquid metals in longitudinally wetted bundles of rods / V.M. Borishanskii, M.A. Gotovskii, E.V. Firsova // Soviet Atomic Energy. – 1969. – Vol. 27. – № 6. – P. 1347-1350.
14. Van der Ros, T. Mass and heat exchange between adjacent channels in liquid-cooled rod bundles / T. Van der Ros, M. Bogaardt // Nuclear Engineering and Design. – 1970. – Vol. 12. – № 2. – P. 259-268.
15. Rehme, K. Pressure drop performance of rod bundles in hexagonal arrangements / K. Rehme // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1972. – Vol. 15. – № 12. – P. 2499-2517.
16. Rehme, K. Pressure drop correlations for fuel element spacers / K. Rehme // Nuclear Technology. – 1973. – Vol. 17. – № 1. – P. 15-23.
17. Maubach, K. Pressure drop for parallel flow through a roughened rod cluster / K. Maubach, K. Rehme // Nuclear Engineering and Design. – 1973. – Vol. 25. – № 3. – P. 369-378.
18. Marek, J. Heat transfer and pressure drop performance of rod bundles arranged in square arrays / J. Marek, K. Maubach, K. Rehme // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1973. – Vol. 16. – № 12. – P. 2215-2228.
19. Rehme, K. The structure of turbulent flow through a wall subchannel of a rod bundle / K. Rehme // Nuclear Engineering and Design. – 1978. – Vol. 45. – № 2. – P. 311-323.
20. Trupp, A.C. The structure of turbulent flow in triangular array rod bundles / A.C. Trupp, R.S. Azad // Nuclear Engineering and Design. – 1975. – Vol. 32. – № 1. – P. 47-84.
21. Eichhorn, R. Measurements of shear stress in a square array rod bundle / R. Eichhorn, H.C. Kao, S. Neti // Nuclear Engineering and Design. – 1980. – Vol. 56. – № 2. – P. 385-391.
22. Hooper, J.D. Developed single phase turbulent flow through a square-pitch rod cluster / J.D. Hooper // Nuclear Engineering and Design. – 1980. – Vol. 60. – № 3. – P. 365-379.
23. Rehme, K. Turbulent momentum transport in rod bundles / K. Rehme // Nuclear Engineering and Design. – 1980. – Vol. 62. – № 1. – P. 137-146.

24. Seale, W.J. Measurements and predictions of fully developed turbulent flow in a simulated rod bundle / W.J. Seale // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1982. – Vol. 123. – P. 399-423.
25. Hooper, J.D. Large-scale structural effects in developed turbulent flow through closely-spaced rod arrays / J.D. Hooper, K. Rehme // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1984. – Vol. 145. – P. 305-337.
26. Hooper, J.D. Fully developed rod bundle flow over a large range of Reynolds number / J.D. Hooper, D.H. Wood // *Nuclear Engineering and Design*. – 1984. – Vol. 83. – № 1. – P. 31-46.
27. Abdelghany, M. Measurements of wall shear stress in axial flow in a square lattice rectangular rod bundle / M. Abdelghany, R. Eichhorn // *Journal of Fluids Engineering*. – 1986. – Vol. 108. – № 2. – P. 166-172.
28. Rehme, K. The structure of turbulent flow through rod bundles / K. Rehme // *Nuclear Engineering and Design*. – 1987. – Vol. 99. – P. 141-154.
29. Rehme, K. On the development of turbulent flow in wall subchannels of a rod bundle / K. Rehme // *Nuclear Technology*. – 1987. – Vol. 77. – № 3. – P. 331-342.
30. Rehme, K. Experimental observations of turbulent flow through subchannels of rod bundles / K. Rehme // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 1989. – Vol. 2. – № 3. – P. 341-349.
31. Möller, S.V. On phenomena of turbulent flow through rod bundles / S.V. Möller // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 1991. – Vol. 4. – № 1. – P. 25-35.
32. Ouma, B.H. Turbulence structure in triangular subchannels of a reactor bundle model / B.H. Ouma, S. Tavoularis // *Nuclear Engineering and Design*. – 1991. – Vol. 128. – № 3. – P. 271-287.
33. Ouma, B.H. Flow measurements in rod bundle subchannels with varying rod-wall proximity / B.H. Ouma, S. Tavoularis // *Nuclear Engineering and Design*. – 1991. – Vol. 131. – № 2. – P. 193-208.
34. Möller, S.V. Single-phase turbulent mixing in rod bundles / S.V. Möller // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 1992. – Vol. 5. – № 1. – P. 26-33.
35. Wu, X. Experimental study on the unusual turbulence intensity distributions in rod-to-wall gap regions / X. Wu, A.C. Trupp // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 1993. – Vol. 6. – № 4. – P. 360-370.
36. Meyer, L. Measurements of turbulent velocity and temperature in axial flow through a heated rod bundle / L. Meyer // *Nuclear Engineering and Design*. – 1994. – Vol. 146. – № 1. – P. 71-82.

37. Wu, X. Spectral measurements and mixing correlation in simulated rod bundle subchannels / X. Wu, A.C. Trupp // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1994. – Vol. 37. – № 8. – P. 1277-1281.
38. Wu, X. On the transport mechanisms in simulated heterogeneous rod bundle subchannels / X. Wu // *Nuclear Engineering and Design*. – 1995. – Vol. 158. – № 1. – P. 125-134.
39. Krauss, T. Characteristics of turbulent velocity and temperature in a wall channel of a heated rod bundle / T. Krauss, L. Meyer // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 1996. – Vol. 12. – № 1. – P. 75-86.
40. Krauss, T. Experimental investigation of turbulent transport of momentum and energy in a heated rod bundle / T. Krauss, L. Meyer // *Nuclear Engineering and Design*. – 1998. – Vol. 180. – № 3. – P. 185-206.
41. Baratto, F. Measurements of frequencies and spatial correlations of coherent structures in rod bundle flows / F. Baratto, S.C.C. Bailey, S. Tavoularis // *Nuclear Engineering and Design*. – 2006. – Vol. 236. – № 17. – P. 1830-1837.
42. Don, A. Measurements of turbulent flow in a large-scale model of a 37-rod bundle / A. Don, S. Tavoularis // *Nuclear Engineering and Design*. – 2018. – Vol. 337. – P. 116-127.
43. Rowe, D.S. Implications concerning rod bundle crossflow mixing based on measurements of turbulent flow structure / D.S. Rowe, B.M. Johnson, J.G. Knudsen // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1974. – Vol. 17. – № 3. – P. 407-419.
44. Carajilescov, P. Experimental and analytical study of axial turbulent flows in an interior subchannel of a bare rod bundle / P. Carajilescov, N.E. Todreas // *Journal of Heat Transfer*. – 1976. – Vol. 98. – № 2. – P. 262-268.
45. Bartzis, J.G. Turbulence modeling of axial flow in a bare rod bundle / J.G. Bartzis, N.E. Todreas // *Journal of Heat Transfer*. – 1979. – Vol. 101. – № 4. – P. 628-634.
46. Ching-Chang Chieng. Velocity distribution in the peripheral subchannels of the CANDU-type 19 rod bundle / Ching-Chang Chieng, Chaung Lin // *Nuclear Engineering and Design*. – 1979. – Vol. 55. – № 3. – P. 389-394.
47. Neti, S. Laser doppler measurements of flow in a rod bundle / S. Neti, R. Eichhorn, O.J. Hahn // *Nuclear Engineering and Design*. – 1983. – Vol. 74. – № 1. – P. 105-116.



48. Renksizbulut, M. An experimental study of turbulent flow through a square-array rod bundle / M. Renksizbulut, G.I. Hadaller // Nuclear Engineering and Design. – 1986. – Vol. 91. – № 1. – P. 41-55.
49. Vonka, V. Measurement of secondary flow vortices in a rod bundle / V. Vonka // Nuclear Engineering and Design. – 1988. – Vol. 106. – № 2. – P. 191-207.
50. Fen Shen, Y. An investigation of crossflow mixing effect caused by grid spacer with mixing blades in a rod bundle / Y. Fen Shen, Z. Dong Cao, Q. Gang Lu // Nuclear Engineering and Design. – 1991. – Vol. 125. – № 2. – P. 111-119.
51. Measurements of turbulent flow in PWR rod bundles with spacer grids / S.-K. Yang, H.-J. Chung, S.-Y. Chun, [et al.] // Nuclear Engineering and Technology. – 1992. – Vol. 24. – № 3. – P. 263-273.
52. Yang, S.-K. Spacer grid effects on turbulent flow in rod bundles / S.-K. Yang, M.-K. Chung // Nuclear Engineering and Technology. – 1996. – Vol. 28. – № 1. – P. 56-71.
53. Phenomenological investigations on the turbulent flow structures in a rod bundle array with mixing devices / S.K. Chang, S.K. Moon, W.P. Baek, [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2008. – Vol. 238. – № 3. – P. 600-609.
54. Caraghiaur, D. Experimental investigation of turbulent flow through spacer grids in fuel rod bundles / D. Caraghiaur, H. Anglart, W. Frid // Nuclear Engineering and Design. – 2009. – Vol. 239. – № 10. – P. 2013-2021.
55. Measurements of the flow characteristics of the lateral flow in the 6×6 rod bundles with Tandem Arrangement Vanes / S.Y. Han, J.S. Seo, M.S. Park, [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2009. – Vol. 239. – № 12. – P. 2728-2736.
56. Experimental investigation on anisotropic turbulent flow in a 6×6 rod bundle with LDV / J. Xiong, N. Yu, Y. Yu, [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – Vol. 278. – P. 333-343.
57. Bertocchi, F. LDA measurements of coherent flow structures and cross-flow across the gap of a compound channel with two half-rods / F. Bertocchi, M. Rohde, J.L. Kloosterman // Nuclear Engineering and Design. – 2018. – Vol. 326. – P. 17-30.
58. Measurements of turbulent flows in a 2×2 rod bundle / S. Hosokawa, T. Yamamoto, J. Okajima, [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2012. – Vol. 249. – P. 2-13.

59. Experimental benchmark data for PWR rod bundle with spacer-grids / E.E. Dominguez-Ontiveros, Y.A. Hassan, M.E. Conner, [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2012. – Vol. 253. – P. 396-405.
60. Conner, M.E. Hydraulic benchmark data for PWR mixing vane grid / M.E. Conner, Y.A. Hassan, E.E. Dominguez-Ontiveros // Nuclear Engineering and Design. – 2013. – Vol. 264. – P. 97-102.
61. Dominguez-Ontiveros, E. Experimental study of a simplified 3×3 rod bundle using DPTV / E. Dominguez-Ontiveros, Y.A. Hassan // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – Vol. 279. – P. 50-59.
62. Nguyen, T. Stereoscopic particle image velocimetry measurements of flow in a rod bundle with a spacer grid and mixing vanes at a low Reynolds number / T. Nguyen, Y. Hassan // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2017. – Vol. 67. – P. 202-219.
63. Stereoscopic PIV measurements of near-wall flow in a tightly packed rod bundle with wire spacers / T. Nguyen, N. Goth, P. Jones, [et al.] // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2018. – Vol. 92. – P. 420-435.
64. PIV study of velocity distribution and turbulence statistics in a rod bundle / X. Li, Z. Mi, S. Tan, [et al.] // Annals of Nuclear Energy. – 2018. – Vol. 117. – P. 305-317.
65. PIV measurement of cross flow in a rod bundle assisted by telecentric optics and matched index of refraction / J. Xiong, W. Qu, Z. Wu, [et al.] // Annals of Nuclear Energy. – 2018. – Vol. 120. – P. 540-545.
66. Experimental investigation of the turbulent flow in a rod bundle channel with spacer grids / P. Qi, X. Li, X. Li, [et al.] // Annals of Nuclear Energy. – 2019. – Vol. 130. – P. 142-156.
67. Donne, M.D. Thermo-fluid-dynamic experiments with gas-cooled bundles of rough rods and their evaluation with the computer code SAGAPØ / M.D. Donne, A. Martelli, K. Rehme // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1979. – Vol. 22. – № 10. – P. 1355-1374.
68. Hassan, M.A. Heat transfer near spacer grids in gas-cooled rod bundles / M.A. Hassan, K. Rehme // Nuclear Technology. – 1981. – Vol. 52. – № 3. – P. 401-414.
69. Hudina, M. Pressure drop and heat transfer in gas-cooled rod bundles / M. Hudina, M. Huggenberger // Nuclear Engineering and Design. – 1986. – Vol. 97. – № 3. – P. 347-360.
70. Experimental tests on the applicability of a radioactive tracer technique for measuring coolant mixing in nuclear reactor fuel subassemblies / F. Castellani, G. Curzio, L. Pieve, [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 1975. – Vol. 32. – № 1. – P. 105-109.

71. Seale, W.J. Turbulent diffusion of heat between connected flow passages Part 1: Outline of problem and experimental investigation / W.J. Seale // Nuclear Engineering and Design. – 1979. – Vol. 54. – № 2. – P. 183-195.
72. Roidt, R.M. Experimental investigations of the hydraulic field in wire-wrapped LMFBR core assemblies / R.M. Roidt, M.D. Carelli, R.A. Markley // Nuclear Engineering and Design. – 1980. – Vol. 62. – № 1. – P. 295-321.
73. The effect of support grid features on local, single-phase heat transfer measurements in rod bundles / M.V. Holloway, M.E. Conner, H.L. McClusky, [et al.] // Journal of Heat Transfer. – 2004. – Vol. 126. – № 1. – P. 43-53.
74. The effect of support grid design on azimuthal variation in heat transfer coefficient for rod bundles / M.V. Holloway, T.A. Conover, H.L. McClusky, [et al.] // Journal of Heat Transfer. – 2005. – Vol. 127. – № 6. – P. 598.
75. Holloway, M.V. Single-phase convective heat transfer in rod bundles / M.V. Holloway, D.E. Beasley, M.E. Conner // Nuclear Engineering and Design. – 2008. – Vol. 238. – № 4. – P. 848-858.
76. Experimental study of local coolant hydrodynamics in TVS-Kvadrat PWR reactor fuel assembly using mixing spacer grids with different types of deflectors / S.M. Dmitriev, S.S. Borodin, A.V. Varentsov, [et al.] // Nuclear Energy and Technology. – 2015. – Vol. 1. – № 4. – P. 296-303.
77. Исследования гидродинамических характеристик и особенностей течения теплоносителя за дистанционирующей решеткой тепловыделяющей сборки реактора плавучего энергоблока / С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, М.А. Легчанов, [и др.] // Теплофизика И Аэромеханика. – 2016. – Т. 23. – № 3. – С. 385-394.
78. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСа ВВЭР / С.М. Дмитриев, С.С. Бородин, М.А. Легчанов, [и др.] // Атомная Энергия. – 2012. – Т. 113. – № 5. – С. 252-256.
79. Experimental investigation of fluid mixing inside a rod bundle using laser induced fluorescence / X. Li, Z. Mi, S. Tan, [et al.] // Progress in Nuclear Energy. – 2019. – Vol. 110. – P. 90-102.
80. Experimental study on the heat transfer enhancement in sub-channels of  $6 \times 6$  rod bundle with large scale vortex flow mixing vanes / S.-J. Byun, C.-H. Shin, J. Yoon, [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2018. – Vol. 339. – P. 105-115.

81. Experimental study on the grid-enhanced heat transfer at supercritical pressures in rod bundle / J. Chen, Z. Xiong, Y. Xiao, [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – Vol. 156. – P. 299-309.
82. Liu, D. Study on heat transfer behavior in rod bundles with spacer grid / D. Liu, H. Gu // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 120. – P. 1065-1075.
83. Lomperski, S. Distributed temperature sensing inside a 19-rod bundle / S. Lomperski, N. Bremer, C. Gerardi // *Nuclear Engineering and Design*. – 2017. – Vol. 319. – P. 201-209.
84. Экспериментальное исследование влияния дистанционирующей решетки на структуру течения в ТВС реактора АЭС-2006 / О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, Н.А. Прибатурин, [и др.] // *Теплоэнергетика*. – 2013. – № 1. – С. 63.
85. Экспериментальное исследование напряжения трения при течении жидкости в модели ТВС / Н.А. Прибатурин, П.Д. Лобанов, В.В. Рандин, [и др.] // *Теплофизика и Аэромеханика*. – 2020. – Т. 27. – № 6. – С. 869-874.
86. Экспериментальное исследование влияния дистанционирующей решётки на распределение напряжения трения в модели ТВС / Н.А. Прибатурин, П.Д. Лобанов, В.В. Рандин, [и др.] // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2021. – Т. 28. – № 4. – С. 557-567.
87. Гидравлическое сопротивление ТВС быстрых реакторов / А.В. Жуков, А.П. Сорокин, П.А. Титов, [и др.] // *ФЭИ-1707*. – 1985. – С. 27.
88. Influence of spacer elements on flow distribution and heat transfer in experimental models of fuel assemblies / O. Kashinsky, D. Kulikov, A. Kurdyumov, [et al.] // *26th International Conference on Nuclear Engineering*. – London, England, 2018. – P. V06BT08A034.
89. Kutateladze, S.S. Heat transfer in liquid metals / S.S. Kutateladze, V.M. Borishanskii, I.I. Novikov // *Journal of Nuclear Energy*. – 1959. – Vol. 9. – № 1. – P. 214-229.
90. Кутателадзе, С.С. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – ГЭИ, 1958. – 418 с.
91. Кутателадзе, С.С. Теплообмен в жидких металлах / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский, И.И. Новиков // *Атомная Энергия*. – 1958. – Т. 4. – № 5. – С. 422-436.
92. Martinelli, R.C. Heat transfer to molten metals / R.C. Martinelli // *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs*. – 1947. – Vol. 69. – P. 947-959.

93. Lyon, R.N. Liquid metal heat transfer coefficient / R.N. Lyon // *Chemical Engineering Progress*. – 1951. – Vol. 47. – P. 75-79.
94. Ching-Jen, C. Laminar and turbulent heat transfer in the pipe entrance region for liquid metals / C. Ching-Jen, Jenq Shing Chiou // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1981. – Vol. 24. – № 7. – P. 1179-1189.
95. Rensen, Q. Experimental investigation of turbulent heat transfer to liquid sodium in the thermal entrance region of an annulus / Q. Rensen // *Nuclear Engineering and Design*. – 1982. – Vol. 68. – № 3. – P. 397-404.
96. Johnson, H.A. Heat transfer to molten lead-bismuth eutectic in turbulent pipe flow / H.A. Johnson, J.P. Hartnett, W.J. Clabaugh // *Journal of Heat Transfer*. – 1953. – Vol. 75. – P. 1191-1198.
97. Seban, R.A. Heat transfer to lead bismuth in turbulent flow in an annulus / R.A. Seban, D.F. Casey. – United States Atomic Energy Commission, Technical Information Service, 1956. – 20 p.
98. Bobkov, V.P. Analysis of data and recommendations on heat transfer by liquid metals in rod bundles / V.P. Bobkov, V.N. Vinogradov, N.V. Kozina // *Soviet Atomic Energy*. – 1988. – Vol. 65. – № 6. – P. 1007-1011.
99. Borishanskii, V.M. Heat exchange in the longitudinal flow of metallic sodium past a tube bank / V.M. Borishanskii, E.V. Firsova // *Soviet Atomic Energy*. – 1963. – Vol. 14. – № 6. – P. 614-615.
100. Borishanskii, V.M. Heat exchange in separated bundles of rods with metallic sodium flowing longitudinally / V.M. Borishanskii, É.V. Firsova // *Soviet Atomic Energy*. – 1964. – Vol. 16. – № 5. – P. 562-563.
101. Mikityuk, K. Heat transfer to liquid metal: Review of data and correlations for tube bundles / K. Mikityuk // *Nuclear Engineering and Design*. – 2009. – Vol. 239. – № 4. – P. 680-687.
102. Review of fuel assembly and pool thermal hydraulics for fast reactors / F. Roelofs, V.R. Gopala, S. Jayaraju, [et al.] // *Nuclear Engineering and Design*. – 2013. – Vol. 265. – P. 1205-1222.
103. Sesonske, A. Heat transfer in liquid-metal cooled fast reactors / A. Sesonske // *Advances in Nuclear Science and Technology* / eds. E.J. Henley, J. Lewins. – Academic Press, 1972. – P. 175-201.
104. Kirillov, P.L. Heat transfer to liquid metals: Specific features, methods of investigation, and main relationships / P.L. Kirillov, P.A. Ushakov // *Thermal Engineering*. – 2001. – Vol. 48. – № 1. – P. 50-59.

105. Жуков, А.В. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов. Теоретические основы и физика процесса. / А.В. Жуков, А.П. Сорокин, Н.М. Матюхин. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 130 с.
106. Кириллов, П.Л. Теплообмен жидких металлов: особенности, методы исследований и основные зависимости / П.Л. Кириллов, П.А. Ушаков // Теплоэнергетика. – 2001. – Т. 1. – № 1. – С. 49-56.
107. Кириллов, П.Л. Теплообмен жидких металлов в пучках стержней / П.Л. Кириллов, П.А. Ушаков // Теплоэнергетика. – 2001. – № 2. – С. 40-45.
108. BR2 bundle mockup heat transfer experiments / M. Dalle Donne, J. Marek, A. Martelli, [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 1977. – Vol. 40. – № 1. – P. 143-156.
109. Hudina, M. The hexagonal bundle heat transfer and fluid flow experiment agathe hex / M. Hudina, G. Markòczy // Nuclear Engineering and Design. – 1977. – Vol. 40. – № 1. – P. 121-131.
110. Fakory, M. Experimental investigation of flow resistance and wall shear stress in the interior subchannel of a triangular array of parallel rods / M. Fakory, N. Todreas // Journal of Fluids Engineering. – 1979. – Vol. 101. – № 4. – P. 429-434.
111. Grover, R.B. Pressure drop along longitudinally-finned seven-rod cluster nuclear fuel elements / R.B. Grover, V. Venkat Raj // Nuclear Engineering and Design. – 1980. – Vol. 58. – № 1. – P. 79-83.
112. Rehme, K. Pressure drop and velocity distribution in rod bundles with spacer grids / K. Rehme, G. Trippe // Nuclear Engineering and Design. – 1980. – Vol. 62. – № 1-3. – P. 349-359.
113. Hejna, J. Turbulent flow in rod bundles with geometrical disturbances / J. Hejna, F. Mantlík // Nuclear Technology. – 1982. – Vol. 59. – № 3. – P. 509-525.
114. Analysis of the fast reactors' fuel-rod bundle flow resistance / A.V. Zhukov, A.P. Sorokin, P.A. Titov, [et al.] // Soviet Atomic Energy. – 1986. – Vol. 60. – № 5. – P. 369-374.
115. Sung-Ho, K. Heat transfer experiments for low flow of water in rod bundles / K. Sung-Ho, M. El-Genk // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1989. – Vol. 32. – P. 1321-1336.
116. Guellouz, M.S. Heat transfer in rod bundle subchannels with varying rod-wall proximity / M.S. Guellouz, S. Tavoularis // Nuclear Engineering and Design. – 1992. – Vol. 132. – № 3. – P. 351-366.

117. Thermohydraulic problems in lead-cooled reactors / A.V. Zhukov, A.P. Sorokin, P.A. Titov, [et al.] // Atomic Energy. – 1992. – Vol. 72. – № 2. – P. 138-147.
118. Mohanty, A.K. Low reynolds number flow and heat transfer experiments in 7-rod vertical bundles / A.K. Mohanty, S.C. Haldar, S. Sengupta // Nuclear Engineering and Design. – 1993. – Vol. 143. – № 1. – P. 83-93.
119. Pressure drop characteristics in tight-lattice bundles for reduced-moderation water reactors / H. Tamai, M. Kureta, H. Yoshida, [et al.] // JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering. – 2004. – Vol. 47. – № 2. – P. 293-298.
120. Silin, N. Thermal mixing between subchannels: measurement method and applications / N. Silin, L. Juanicó, D. Delmastro // Nuclear Engineering and Design. – 2004. – Vol. 227. – № 1. – P. 51-63.
121. Shin, B.S. Experimental study on the effect of angles and positions of mixing vanes on CHF in a 2×2 rod bundle with working fluid R-134a / B.S. Shin, S.H. Chang // Nuclear Engineering and Design. – 2005. – Vol. 235. – № 16. – P. 1749-1759.
122. Single- and two-phase turbulent mixing rate between subchannels in triangle tight lattice rod bundle / A. Kawahara, M. Sadatomi, H. Kudo, [et al.] // JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering. – 2006. – Vol. 49. – № 2. – P. 287-295.
123. Pressure drop experiments using tight-lattice 37-rod bundles / H. Tamai, M. Kureta, A. Ohnuki, [et al.] // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2006. – Vol. 43. – № 6. – P. 699-706.
124. Silin, N. Experimental study on the Reynolds number dependence of turbulent mixing in a rod bundle / N. Silin, L. Juanicó // Nuclear Engineering and Design. – 2006. – Vol. 236. – № 18. – P. 1860-1866.
125. Shin, B.S. CHF experiment and CFD analysis in a 2×3 rod bundle with mixing vane / B.S. Shin, S.H. Chang // Nuclear Engineering and Design. – 2009. – Vol. 239. – № 5. – P. 899-912.
126. Cheng, X. Local thermal–hydraulic behaviour in tight 7-rod bundles / X. Cheng, Y.Q. Yu // Nuclear Engineering and Design. – 2009. – Vol. 239. – № 10. – P. 1944-1955.
127. Ylönen, A. Single-phase cross-mixing measurements in a 4×4 rod bundle / A. Ylönen, W.-M. Bissels, H.-M. Prasser // Nuclear Engineering and Design. – 2011. – Vol. 241. – № 7. – P. 2484-2493.

128. Krapivtsev, V.G. Flow and heat transfer in fuel rod bundles of water-cooled reactors with modified cell-type spacer grids / V.G. Krapivtsev, P.V. Markov, V.I. Solonin // Nuclear Energy and Technology. – 2015. – Vol. 1. – № 2. – P. 153-157.
129. Flow distribution and pressure loss in subchannels of a wire-wrapped 37-pin rod bundle for a sodium-cooled fast reactor / S.-K. Chang, D.-J. Euh, H.S. Choi, [et al.] // Nuclear Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 48. – № 2. – P. 376-385.
130. Liu, D. The spacer grid effect on heat transfer at low flow rate in a 5×5 rod bundles / D. Liu, H. Gu, S. Gong. – Charlotte, North Carolina, USA, 2016. – P. V003T09A065.
131. Lee, C.Y. Augmentation of single-phase forced convection heat transfer in tightly arrayed rod bundle with twist-vane spacer grid / C.Y. Lee, W.K. In, J.K. Lee // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2016. – Vol. 76. – P. 185-192.
132. Wang, H. Experimental investigation on boiling heat transfer of high pressure water in a SCWR sub-channel / H. Wang, W. Wang, Q. Bi // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 105. – P. 799-810.
133. Жуков, А.В. Анализ бенчмарк-эксперимента по гидравлике и теплообмену в сборке имитаторов твэлов с жидкометаллическим охлаждением / А.В. Жуков, Ю.А. Кузина, А.П. Сорокин // Атомная Энергия. – 2005. – Т. 99. – № 5. – С. 336-348.
134. Temperature fields and heat transfer in free-packed fuel pin bundles cooled by heavy liquid metal / A.V. Zhukov, Yu.A. Kuzina, A.P. Sorokin, [et al.] // Nuclear Energy and Technology. – 2016. – Vol. 2. – № 1. – P. 70-75.
135. Фомичев, Д.В. Структура турбулентного потока в пучках стержней тепловыделяющих сборок реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 / Д.В. Фомичев, В.И. Солонин // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия машиностроение. – 2015. – № 3 (102). – С. 4-16.
136. Heavy-liquid metal heat transfer experiment in a 19-rod bundle with grid spacers / J. Pacio, M. Daubner, F. Fellmoser, [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – Vol. 273. – P. 33-46.
137. Heat transfer to liquid metals in a hexagonal rod bundle with grid spacers: Experimental and simulation results : Thermal-Hydraulics of Innovative Nuclear Systems / J. Pacio, K. Litfin, A. Batta, [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2015. – Vol. 290. – P. 27-39.



138. Heat transfer to mercury in parallel flow through bundles of circular rods / O.E. Dwyer, A. Friedland, M.V. Maresca, [et al.] // International Heat Transfer Conference. – Boulder (CO, USA), 1961. – P. Number Paper No.62.
139. Maresca, M.W. Heat Transfer to Mercury Flowing In-Line Through a Bundle of Circular Rods / M.W. Maresca, O.E. Dwyer // Journal of Heat Transfer. – 1964. – Vol. 86. – № 2. – P. 180-186.
140. Kalish, S. Heat transfer to NaK flowing through unbaffled rod bundles / S. Kalish, O.E. Dwyer // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1967. – Vol. 10. – № 11. – P. 1533-1558.
141. Zhukov, A.V. Heat transfer from loosely-spacer [fuel] rod clusters to liquid metal flowing in the axial direction / A.V. Zhukov, V.I. Subbotin, P.A. Ushakov // Liquid Metals. National Aeronautic and Space Administration (translated from Atomizdat). – 1967. – P. 149-169.
142. Hlavac, P.J. Heat Transfer to Mercury Flowing In Line Through an Unbaffled Rod Bundle: Experimental Study of the Effect of Rod Displacement on Rod-Average Heat Transfer Coefficients / P.J. Hlavac, O.E. Dwyer, M.A. Helfant // Journal of Heat Transfer. – 1969. – Vol. 91. – № 4. – P. 568-580.
143. Subbotin, V.I. Experimental study on models of the operating temperature regimes of the fuel elements of a BOR-60 reactor. / V.I. Subbotin, A.V. Zhukov, M. Pashek // Heat Transfer - Sov. Res. – 1971. – Vol. 3. – № 5. – P. 15-26.
144. Gräber, H. Experimentelle Untersuchungen des Wärmeübergangs an Flüssigmetalle (NaK) in parallel durchströmten Rohrbündeln bei konstanter und exponentieller Wärme flu ß dichte verteilung / H. Gräber, M. Rieger. – 1972. – Vol. 19. – № 1. – P. 23-40.
145. Experimental study of heavy-liquid metal (LBE) flow and heat transfer along a hexagonal 19-rod bundle with wire spacers / J. Pacio, M. Daubner, F. Fellmoser, [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2016. – Vol. 301. – P. 111-127.
146. Hlavac, P.J. Experimental study of effect of wetting on turbulent flow of mercury in annuli / P.J. Hlavac, B.G. Nimmo, O.E. Dwyer // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1972. – Vol. 15. – № 12. – P. 2611-2631.
147. Chung, S.Y. Direct numerical simulation of turbulent concentric annular pipe flow: Part 1: Flow field / S.Y. Chung, G.H. Rhee, H.J. Sung // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2002. – Vol. 23. – № 4. – P. 426-440.

148. Chung, S.Y. Direct numerical simulation of turbulent concentric annular pipe flow: Part 2: Heat transfer / S.Y. Chung, H.J. Sung // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2003. – Vol. 24. – № 3. – P. 399-411.
149. The characteristics of turbulent flow and convection in concentric circular annuli. Part I: flow / M. Kaneda, B. Yu, H. Ozoe, [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2003. – Vol. 46. – № 26. – P. 5045-5057.
150. Kakac, S. Handbook of single-phase convective heat transfer / S. Kakac, R.K. Shah, W. Aung. – 1987.
151. Dwyer, O.E. Eddy transport in liquid-metal heat transfer / O.E. Dwyer // *AIChE Journal*. – 1963. – Vol. 9. – № 2. – P. 261-268.
152. The computed characteristics of turbulent flow and convection in concentric circular annuli. Part II. Uniform heating on the inner surface / B. Yu, Y. Kawaguchi, M. Kaneda, [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2005. – Vol. 48. – № 3. – P. 621-634.
153. Experimental investigation on turbulent heat transfer in liquid metal along a heated rod in a vertical annulus / A. Loges, T. Baumann, L. Marocco, [et al.] // *The 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-14)*. – Toronto, Ontario, Canada, 2011.
154. Lead coolant modeling in system thermal-hydraulic code HYDRA-IBRAE/LM and some validation results / N.A. Mosunova, V.M. Alipchenkov, N.A. Pribaturin, [et al.] // *Nuclear Engineering and Design*. – 2020. – Vol. 359. – P. 110463.
155. Bai, H. Bubble formation during horizontal gas injection into downward-flowing liquid / H. Bai, B.G. Thomas // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2001. – Vol. 32. – № 6. – P. 1143-1159.
156. Davidson, J.F. Bubble formation at an orifice in a viscous liquid / J.F. Davidson, B.O.G. Schüller // *Chemical Engineering Research and Design*. – 1997. – Vol. 75. – P. 105-115.
157. Hydrogen production via methane pyrolysis in a liquid metal bubble column reactor with a packed bed / T. Geißler, A. Abánades, A. Heinzl, [et al.] // *Chemical Engineering Journal*. – 2016. – Vol. 299. – P. 192-200.
158. Euler-Euler simulation and X-ray measurement of bubble chain in a shallow container filled with liquid metals / L. Liu, O. Keplinger, T. Ma, [et al.] // *Chemical Engineering Science*. – 2018. – Vol. 192. – P. 288-305.

159. Keplinger, O. Visualization of bubble coalescence in bubble chains rising in a liquid metal / O. Keplinger, N. Shevchenko, S. Eckert // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2018. – Vol. 105. – P. 159-169.
160. Keplinger, O. Experimental investigation of bubble breakup in bubble chains rising in a liquid metal / O. Keplinger, N. Shevchenko, S. Eckert // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2019. – Vol. 116. – P. 39-50.
161. Experimental and computational investigation of LBE–water interaction in LIFUS 5 facility / A. Ciampichetti, D. Pellini, P. Agostini, [et al.] // *Nuclear Engineering and Design*. – 2009. – Vol. 239. – № 11. – P. 2468-2478.
162. Jeltsov, M. Steam generator leakage in lead cooled fast reactors: Modeling of void transport to the core / M. Jeltsov, W. Villanueva, P. Kudinov // *Nuclear Engineering and Design*. – 2018. – Vol. 328. – P. 255-265.
163. Steam generator tube rupture in lead-cooled fast reactors: Estimation of impact on neighboring tubes / A.S. Iskhakov, V.I. Melikhov, O.I. Melikhov, [et al.] // *Nuclear Engineering and Design*. – 2019. – Vol. 341. – P. 198-208.
164. Hugoniot analysis of experimental data on steam explosion in stratified melt-coolant configuration / A.S. Iskhakov, V.I. Melikhov, O.I. Melikhov, [et al.] // *Nuclear Engineering and Design*. – 2019. – Vol. 347. – P. 151-157.
165. Measurements of liquid–metal two-phase flow by using neutron radiography and electrical conductivity probe / Y. Saito, K. Mishima, Y. Tobita, [et al.] // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2005. – Vol. 29. – № 3. – P. 323-330.
166. Saito, Y. Bubble measurements in liquid-metal two-phase flow by using a four-sensor probe / Y. Saito, K. Mishima // *Multiphase Science and Technology*. – 2012. – Vol. 24. – № 4.
167. Controllable generation of a submillimeter single bubble in molten metal using a low-pressure macrosized cavity / A. Konovalenko, P. Sköld, P. Kudinov, [et al.] // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2017. – Vol. 48. – № 2. – P. 1064-1072.
168. Drag coefficients of single bubbles under normal and micro gravity conditions / A. Tomiyama, I. Kataoka, I. Zun, [et al.] // *JSME International Journal Series B*. – 1998. – Vol. 41. – № 2. – P. 472-479.

169. Saito, Y. Direct contact evaporation of a water droplet in a molten-metal pool / Y. Saito, K. Mishima, M. Matsubayashi // International Heat Transfer Conference 13. – Sydney, Australia: Begel House Inc., 2006.
170. Бобков, В.П. Исследование процесса испарения капель воды в сплаве : влияние турбулизации сплава на процесс испарения. Физико-энергетический институт. Препринт; ФЭИ-940 / В.П. Бобков, Ю.М. Работяшкин, В.И. Сидоров. – Обнинск: ФЭИ, 1979.
171. Study on Pb-Bi-water direct contact boiling two-phase flow and heat transfer / M. Takahashi, H. Sofue, T. Iguchi, [et al.] // Progress in Nuclear Energy. – 2005. – Vol. 47. – № 1. – P. 569-576.
172. Jeltsov, M. Application of CFD to safety and thermal-hydraulic analysis of lead-cooled systems : Master Thesis / M. Jeltsov. – Stockholm, Sweden: Division of Nuclear Power Safety, Royal Institute of Technology, 2011. – 69 p.
173. Liquid-metal/water direct contact heat exchange: flow visualization, flow stability, and heat transfer using real-time X-ray imaging / S.H. Abdulla, X. Liu, M.H. Anderson, [et al.] // Nuclear Science and Engineering. – 2005. – Vol. 150. – № 2. – P. 182-220.
174. Direct contact heat exchange interfacial phenomena for liquid metal reactors: part II — void fraction / S. Abdulla, X. Liu, M.H. Anderson, [et al.] // 10th International Conference on Nuclear Engineering. – Arlington, Virginia, USA, 2002. – P. 607-612.
175. Visualization of bubbles behavior in lead-bismuth eutectic by gamma-ray / M. Takahashi, T. Yumura, I. Yoda, [et al.] // 18th International Conference on Nuclear Engineering. – Xi'an, China, 2010. – P. 533-539.
176. Безносков, А.В. Эспериментальные исследования процессов, сопровождающих межконтурную неплотность парогенератора со свинцовым и свинецвисмутовым теплоносителями и оптимизация его конструкции / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.А. Молодцов // Известия Высших Учебных Заведений. Ядерная Энергетика. – 2006. – № 4. – С. 61-69.
177. Научно – технический отчет «Результаты расчетно-экспериментальных работ по теме „Экспериментальное обоснование безопасности РУ БРЕСТ-ОД-300 при разгерметизации трубок ПГ“ выполненных в 2012-2014 г.» Физико-энергетический институт. Препринт; ФЭИ-940. – Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2014.
178. LIFUS5/Mod2: The experimental facility for HLM/water interaction investigation / A. Del Nevo, A. Ciampichetti, N. Forgiione, [et al.] // 20th International Conference on Nuclear Engineering

and the ASME 2012 Power Conference. – Anaheim, California, USA, 2012. – LIFUS5/Mod2. – P. 677-684.

179. Pesetti, A. Water/Pb-Bi interaction experiments in LIFUS5/Mod2 facility modelled by SIMMER code / A. Pesetti, N. Forgione, A. Del Nevo // 22nd International Conference on Nuclear Engineering. – Prague, Czech Republic, 2014.

180. Pesetti, A. Assessment of SIMMER-III code based on steam generator tube rupture experiments in LIFUS5/Mod2 facility / A. Pesetti, A. Del Nevo, N. Forgione // 24th International Conference on Nuclear Engineering. – Charlotte, North Carolina, USA, 2016.

181. Bacon, R.P. Large bubbles attached to spargers in downwards two-phase flow / R.P. Bacon, D.M. Scott, R.B. Thorpe // International Journal of Multiphase Flow. – 1995. – Vol. 21. – № 5. – P. 949-959.

182. Gas entrainment by a liquid film falling around a stationary Taylor bubble in a vertical tube / J.P. Kockx, F.T.M. Nieuwstadt, R.V.A. Oliemans, [et al.] // International Journal of Multiphase Flow. – 2005. – Vol. 31. – № 1. – P. 1-24.

183. Dumitrescu, D.T. Strömung an einer Luftblase im senkrechten Rohr / D.T. Dumitrescu // ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. – 1943. – Vol. 23. – № 3. – P. 139-149.

184. Davies, R.M. The mechanics of large bubbles rising through extended liquids and through liquids in tubes / R.M. Davies, G. Taylor // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 1950. – Vol. 200. – № 1062. – P. 375-390.

185. White, E.T. The velocity of rise of single cylindrical air bubbles through liquids contained in vertical tubes / E.T. White, R.H. Beardmore // Chemical Engineering Science. – 1962. – Vol. 17. – № 5. – P. 351-361.

186. Zudin, Y.B. Calculation of the rise velocity of large gas bubbles / Y.B. Zudin // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 1995. – Vol. 68. – № 1. – P. 10-15.

187. Zudin, Y.B. Analytical solution of the problem of the rise of a Taylor bubble / Y.B. Zudin // Physics of Fluids (1994-present). – 2013. – Vol. 25. – № 5. – P. 053302.

188. Зудин, Ю.Б. Скорость всплывания газового пузыря в трубе / Ю.Б. Зудин // Теплофизика и Аэромеханика. – 2013. – Т. 20. – № 1. – С. 29-38.

189. Universal correlation for the rise velocity of long gas bubbles in round pipes / F. Viana, R. Pardo, R. Yáñez, [et al.] // Journal of Fluid Mechanics. – 2003. – Vol. 494. – P. 379-398.

190. A broadly-applicable unified closure relation for Taylor bubble rise velocity in pipes with stagnant liquid / E. Lizarraga-Garcia, J. Buongiorno, E. Al-Safran, [et al.] // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2017. – Vol. 89. – P. 345-358.
191. Nicklin, D.J. Two-phase bubble flow / D.J. Nicklin // *Chemical Engineering Science*. – 1962. – Vol. 17. – № 9. – P. 693-702.
192. The motion of a large gas bubble rising through liquid flowing in a tube / R. Collins, F.F.D. Moraes, J.F. Davidson, [et al.] // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1978. – Vol. 89. – № 3. – P. 497-514.
193. Moissis, R. Entrance effects in a two-phase slug flow / R. Moissis, P. Griffith // *Journal of Heat Transfer*. – 1962. – Vol. 84. – № 1. – P. 29-38.
194. Talvy, C.A. On the interaction between two consecutive elongated bubbles in a vertical pipe / C.A. Talvy, L. Shemer, D. Barnea // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2000. – Vol. 26. – № 12. – P. 1905-1923.
195. Hout, R. van. Evolution of statistical parameters of gas-liquid slug flow along vertical pipes / R. van Hout, D. Barnea, L. Shemer // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2001. – Vol. 27. – № 9. – P. 1579-1602.
196. Shemer, L. Hydrodynamic and statistical parameters of slug flow / L. Shemer // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2003. – Vol. 24. – № 3. – P. 334-344.
197. Barnea, D. Holdup of the liquid slug in two phase intermittent flow / D. Barnea, N. Brauner // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1985. – Vol. 11. – № 1. – P. 43-49.
198. Dukler, A.E. A physical model for predicting the minimum stable slug length / A.E. Dukler, D. Moalem Maron, N. Brauner // *Chemical Engineering Science*. – 1985. – Vol. 40. – № 8. – P. 1379-1385.
199. Fernandes, R.C. Hydrodynamic model for gas-liquid slug flow in vertical tubes / R.C. Fernandes, R. Semiat, A.E. Dukler // *AIChE Journal*. – 1983. – Vol. 29. – № 6. – P. 981-989.
200. Ellipsoidal model of the rise of a Taylor bubble in a round tube / T. Funada, D.D. Joseph, T. Maehara, [et al.] // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2005. – Vol. 31. – № 4. – P. 473-491.
201. Zheng, D. CFD simulations of hydrodynamic characteristics in a gas-liquid vertical upward slug flow / D. Zheng, X. He, D. Che // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2007. – Vol. 50. – № 21-22. – P. 4151-4165.

202. Shemer, L. Visualization of the instantaneous velocity profiles in gas-liquid slug flow / L. Shemer, D. Barnea // PCH. Physicochemical hydrodynamics. – 1987. – Vol. 8. – P. 243-253.
203. Simultaneous PIV and pulsed shadow technique in slug flow: a solution for optical problems / S. Nogueira, R.G. Sousa, A.M.F.R. Pinto, [et al.] // Experiments in Fluids. – 2003. – Vol. 35. – № 6. – P. 598-609.
204. Shemer, L. On the turbulent structure in the wake of Taylor bubbles rising in vertical pipes / L. Shemer, A. Gulitski, D. Barnea // Physics of Fluids. – 2007. – Vol. 19. – № 3. – P. 035108.
205. Flow visualization of two-phase flows using photochromic dye activation method / M. Kawaji, W. Ahmad, J.M. DeJesus, [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 1993. – Vol. 141. – № 1. – P. 343-355.
206. Ahmad, W.R. Falling film hydrodynamics in slug flow / W.R. Ahmad, J.M. DeJesus, M. Kawaji // Chemical Engineering Science. – 1998. – Vol. 53. – № 1. – P. 123-130.
207. Flow in the nose region and annular film around a Taylor bubble rising through vertical columns of stagnant and flowing Newtonian liquids / S. Nogueira, M.L. Riethmuler, J.B.L.M. Campos, [et al.] // Chemical Engineering Science. – 2006. – Vol. 61. – № 2. – P. 845-857.
208. Review on vertical gas-liquid slug flow / A.O. Morgado, J.M. Miranda, J.D.P. Araújo, [et al.] // International Journal of Multiphase Flow. – 2016. – Vol. 85. – P. 348-368.
209. Nakoryakov, V.E. Experimental study of gas-liquid slug flow in a small-diameter vertical pipe / V.E. Nakoryakov, O.N. Kashinsky, B.K. Kozmenko // International Journal of Multiphase Flow. – 1986. – Vol. 12. – № 3. – P. 337-355.
210. Study of local hydrodynamic characteristics of upward slug flow / V.E. Nakoryakov, O.N. Kashinsky, A.V. Petukhov, [et al.] // Experiments in Fluids. – 1989. – Vol. 7. – № 8. – P. 560-566.
211. Nakoryakov, V.E. Wall shear stress from single almost spherical and long Taylor bubbles in laminar upward tube flow / V.E. Nakoryakov, L.S. Timkin, R.S. Gorelik // Journal of Engineering Thermophysics. – 2017. – Vol. 26. – № 3. – P. 303-313.
212. Kashinsky, O.N. Wall shear stress in an upward slug flow in a vertical tube / O.N. Kashinsky, A.S. Kurdyumov, V.V. Randin // Thermophysics and Aeromechanics. – 2006. – Vol. 13. – № 3. – P. 381-385.
213. Mao, Z.-S. An experimental study of gas-liquid slug flow / Z.-S. Mao, A.E. Dukler // Experiments in Fluids. – 1989. – Vol. 8. – № 3-4. – P. 169-182.

214. Mao, Z.-S. The motion of Taylor bubbles in vertical tubes—II. Experimental data and simulations for laminar and turbulent flow / Z.-S. Mao, A.E. Dukler // *Chemical Engineering Science*. – 1991. – Vol. 46. – № 8. – P. 2055-2064.
215. Delfos, R. Measurement of air-entrainment from a stationary Taylor bubble in a vertical tube / R. Delfos, C.J. Wisse, R.V.A. Oliemans // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2001. – Vol. 27. – № 10. – P. 1769-1787.
216. Brauner, N. Modelling of gas entrainment from Taylor bubbles. Part A: Slug flow / N. Brauner, A. Ullmann // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2004. – Vol. 30. – № 3. – P. 239-272.
217. Babin, V. Heat transfer characteristics in a slug unit / V. Babin, D. Barnea, L. Shemer // 14th International Heat Transfer Conference. – Washington, DC, USA, 2010. – P. 929-935.
218. Babin, V. Experimental investigation of the local heat transfer in a vertical gas-liquid slug unit / V. Babin, L. Shemer, D. Barnea // *AIP Conference Proceedings*. – 2012. – Vol. 1428. – № 1. – P. 43-50.
219. Babin, V. Local instantaneous heat transfer around a rising single Taylor bubble / V. Babin, L. Shemer, D. Barnea // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – Vol. 89. – P. 884-893.
220. Scammell, A. Heat transfer and flow characteristics of rising Taylor bubbles / A. Scammell, J. Kim // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2015. – Vol. 89. – P. 379-389.
221. Scammell, A. A study of heat transfer and flow characteristics of rising Taylor bubbles : Doctor of Philosophy / A. Scammell. – Maryland US: University of Maryland, College Park, 2016. – 124 p.
222. On shapes and motion of an elongated bubble in downward liquid pipe flow / A. Fershtman, V. Babin, D. Barnea, [et al.] // *Physics of Fluids*. – 2017. – Vol. 29. – № 11. – P. 112103.
223. Oshinowo, T. Vertical two-phase flow: Part II. Holdup and pressure drop / T. Oshinowo, M.E. Charles // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. – 1974. – Vol. 52. – № 4. – P. 438-448.
224. Ганчев, Б.Г. Процессы гидродинамики и теплообмена в опускающих пузырьковых потоках / Б.Г. Ганчев, В.Г. Пересадыко // *ИФЖ*. – 1985. – Т. 49. – № 2. – С. 181-189.
225. Горелик, Р.С. Исследование опускающего пузырькового течения в вертикальной трубе / Р.С. Горелик, О.Н. Кашинский, В.Е. Накоряков // *ЖПМТФ*. – 1987. – Т. 1. – С. 69-73.



226. Clark, N.N. On vertical downward two phase flow / N.N. Clark, R.L.C. Flemmer // *Chemical Engineering Science*. – 1984. – Vol. 39. – № 1. – P. 170-173.
227. Clark, N.N. Two-phase pressure loss in terms of mixing length theory. 1. Derivation for the general case of dispersed flow / N.N. Clark, R.L.C. Flemmer // *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. – 1985. – Vol. 24. – № 4. – P. 412-418.
228. Clark, N.N. Predicting the holdup in two-phase bubble upflow and downflow using the Zuber and Findlay drift-flux model / N.N. Clark, R.L. Flemmer // *AIChE Journal*. – 1985. – Vol. 31. – № 3. – P. 500-503.
229. 3-D turbulence structure and phase distribution measurements in bubbly two-phase flows / S.K. Wang, S.J. Lee, O.C. Jones, [et al.] // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1987. – Vol. 13. – № 3. – P. 327-343.
230. Kashinsky, O.N. Downward bubbly gas–liquid flow in a vertical pipe / O.N. Kashinsky, V.V. Randin // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1999. – Vol. 25. – № 1. – P. 109-138.
231. Кашинский, О.Н. Опускное газожидкостное течение в вертикальной трубе / О.Н. Кашинский, В.В. Рандин // *Теплофизика и Аэромеханика*. – 1999. – Т. 12. – № 2. – С. 335-341.
232. Experimental study on interfacial area transport of a vertical downward bubbly flow / T. Hibiki, H. Goda, S. Kim, [et al.] // *Experiments in Fluids*. – 2003. – Vol. 35. – № 1. – P. 100-111.
233. Structure of vertical downward bubbly flow / T. Hibiki, H. Goda, S. Kim, [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2004. – Vol. 47. – № 8–9. – P. 1847-1862.
234. Liquid velocity in upward and downward air–water flows / X. Sun, S. Paranjape, S. Kim, [et al.] // *Annals of Nuclear Energy*. – 2004. – Vol. 31. – № 4. – P. 357-373.
235. LDA measurement in air–water downward flow / X. Sun, S. Paranjape, M. Ishii, [et al.] // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2004. – Vol. 28. – № 4. – P. 317-328.
236. Lu, J. A DNS study of laminar bubbly flows in a vertical channel / J. Lu, S. Biswas, G. Tryggvason // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2006. – Vol. 32. – № 6. – P. 643-660.
237. Lu, J. Effect of bubble size in turbulent bubbly downflow in a vertical channel / J. Lu, G. Tryggvason // *Chemical Engineering Science*. – 2007. – Vol. 62. – № 11. – P. 3008-3018.
238. Experimental and numerical study of downward bubbly flow in a pipe / O.N. Kashinsky, P.D. Lobanov, M.A. Pakhomov, [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2006. – Vol. 49. – № 19–20. – P. 3717-3727.

239. Kashinsky, O.N. The influence of a small gas addition to the structure of gas-liquid downward flow in a tube / O.N. Kashinsky, P.D. Lobanov, V.V. Randin // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2008. – Vol. 17. – № 2. – P. 120.
240. Lee, J.Y. Instantaneous and objective flow regime identification method for the vertical upward and downward co-current two-phase flow / J.Y. Lee, M. Ishii, N.S. Kim // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2008. – Vol. 51. – № 13–14. – P. 3442-3459.
241. Local flow regime analysis in vertical co-current downward two-phase flow / J. Enrique Julia, Y. Liu, T. Hibiki, [et al.] // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2013. – Vol. 44. – P. 345-355.
242. Das, A.K. Peak structure in downward gas–liquid bubbly flow and its transition to slug flow – A numerical investigation / A.K. Das, P.K. Das // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2012. – Vol. 40. – P. 136-143.
243. Usui, K. Vertically Downward Two-Phase Flow, (I) / K. Usui, K. Sato // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 1989. – Vol. 26. – № 7. – P. 670-680.
244. Usui, K. Vertically downward two-phase flow, (II) / K. Usui // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 1989. – Vol. 26. – № 11. – P. 1013-1022.
245. Bhagwat, S.M. Similarities and differences in the flow patterns and void fraction in vertical upward and downward two phase flow / S.M. Bhagwat, A.J. Ghajar // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2012. – Vol. 39. – P. 213-227.
246. Tian, D. Model of bubble velocity vector measurement in upward and downward bubbly two-phase flows using a four-sensor optical probe / D. Tian, C. Yan, L. Sun // *Progress in Nuclear Energy*. – 2015. – Vol. 78. – P. 110-120.
247. Lokanathan, M. Flow regime, void fraction and interfacial area transport and characteristics of co-current downward two-phase flow / M. Lokanathan, T. Hibiki // *Nuclear Engineering and Design*. – 2016. – Vol. 307. – P. 39-63.
248. Investigation on the void fraction of gas–liquid two-phase flows in vertically-downward pipes / Y. Xue, H. Li, C. Hao, [et al.] // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2016. – Vol. 77. – P. 1-8.
249. Drift-flux model for downward two-phase flow / H. Goda, T. Hibiki, S. Kim, [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2003. – Vol. 46. – № 25. – P. 4835-4844.

250. Uncertainty in RELAP5/MOD3.2 calculations for interfacial drag in downward two-phase flow / C. Clark, J.P. Schlegel, T. Hibiki, [et al.] // *Annals of Nuclear Energy*. – 2016. – Vol. 94. – P. 230-240.
251. Experimental study on interfacial structure and interfacial area transport in downward two-phase flow / G. Wang, Z. Dang, P. Ju, [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 106. – P. 1303-1317.
252. Qiao, S. Inlet effects on vertical-downward air–water two-phase flow / S. Qiao, D. Mena, S. Kim // *Nuclear Engineering and Design*. – 2017. – Vol. 312. – P. 375-388.
253. Eaton, J.K. A review of research on subsonic turbulent flow reattachment / J.K. Eaton, J.P. Johnston // *AIAA Journal*. – 1981. – Vol. 19. – P. 1093-1100.
254. Simpson, R.L. Aspects of turbulent boundary-layer separation / R.L. Simpson // *Progress in Aerospace Sciences*. – 1996. – Vol. 32. – № 5. – P. 457-521.
255. Ota, T. A Survey of Heat Transfer in Separated and Reattached Flows / T. Ota // *Applied Mechanics Reviews*. – 2000. – Vol. 53. – № 8. – P. 219-235.
256. Terekhov, V.I. Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence / V.I. Terekhov, N.I. Yarygina, R.F. Zhdanov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2003. – Vol. 46. – № 23. – P. 4535-4551.
257. Aloui, F. Experimental study of a two-phase bubbly flow in a flat duct symmetric sudden expansion—Part 1: Visualization, pressure and void fraction / F. Aloui, M. Souhar // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1996. – Vol. 22. – № 4. – P. 651-665.
258. Rinne, A. Development of local two-phase flow parameters for vertical bubbly flow in a pipe with sudden expansion / A. Rinne, R. Loth // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 1996. – Vol. 13. – № 2. – P. 152-166.
259. Bubbly flow in an axisymmetric sudden expansion: Pressure drop, void fraction, wall shear stress, bubble velocities and sizes / F. Aloui, L. Doublier, J. Legrand, [et al.] // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 1999. – Vol. 19. – № 2. – P. 118-130.
260. Ahmed, W.H. Development of two-phase flow downstream of a horizontal sudden expansion / W.H. Ahmed, C.Y. Ching, M. Shoukri // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2008. – Vol. 29. – № 1. – P. 194-206.

261. Investigation of bubble size effect on vertical upward bubbly two-phase pipe flow consisted with an abrupt expansion / A. Voutsinas, T. Shakouchi, K. Tsujimoto, [et al.] // *Journal of Fluid Science and Technology*. – 2009. – Vol. 4. – № 2. – P. 442-453.
262. Wang, C.-C. A new correlation and the review of two-phase flow pressure change across sudden expansion in small channels / C.-C. Wang, C.-Y. Tseng, I.Y. Chen // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2010. – Vol. 53. – № 19. – P. 4287-4295.
263. CFD modelling of polydispersed bubbly two-phase flow around an obstacle / E. Krepper, M. Beyer, T. Frank, [et al.] // *Nuclear Engineering and Design*. – 2009. – Vol. 239. – № 11. – P. 2372-2381.
264. Papoulias, D. Eulerian multiphase predictions of turbulent bubbly flow in a step-channel expansion / D. Papoulias // *9th International Conference on Multiphase Flow*. – Firenze, Italy, 2016.
265. Bel Fdhila, R. Analyse expérimentale et modélisation d'un écoulement vertical à bulles dans un élargissement brusque : thesis / R. Bel Fdhila. – Toulouse, INPT, 1991.
266. Zaichik, L.I. A statistical model for predicting the fluid displaced/added mass and displaced heat capacity effects on transport and heat transfer of arbitrary-density particles in turbulent flows / L.I. Zaichik, V.M. Alipchenkov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2011. – Vol. 54. – № 19. – P. 4247-4265.
267. Dabiri, S. Heat transfer in turbulent bubbly flow in vertical channels / S. Dabiri, G. Tryggvason // *Chemical Engineering Science*. – 2015. – Vol. 122. – P. 106-113.
268. Prajapati, Y.K. Bubble dynamics and flow boiling characteristics in three different microchannel configurations / Y.K. Prajapati, M. Pathak, M.K. Khan // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2017. – Vol. 112. – P. 371-382.
269. Mamalis, D. Bubble rise in a non-isothermal self-rewetting fluid and the role of thermocapillarity / D. Mamalis, V. Koutsos, K. Sefiane // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2017. – Vol. 117. – P. 146-162.
270. Venkateswararao, P. Flow pattern transition for gas-liquid flow in a vertical rod bundle / P. Venkateswararao, R. Semiat, A.E. Dukler // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1982. – Vol. 8. – № 5. – P. 509-524.
271. Flow distribution and slug flow characteristics for hydraulically equilibrium air-water two-phase flows in a vertical 2×3 rod channel / K. Kano, M. Sadatomi, A. Kawahara, [et al.] // *Fluids Engineering Division Summer Meeting (FEDSM 2003)*. – 2003. – P. 1407-1414.

272. Shapes and rising velocities of single bubbles rising through an inner subchannel / A. Tomiyama, Y. Nakahara, Y. Adachi, [et al.] // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2003. – Vol. 40. – № 3. – P. 136-142.
273. Flow characteristics in hydraulically equilibrium two-phase flows in a vertical 2×3 rod bundle channel / M. Sadatomi, A. Kawahara, K. Kano, [et al.] // International Journal of Multiphase Flow. – 2004. – Vol. 30. – № 9. – P. 1093-1119.
274. Single- and two-phase turbulent mixing rate between adjacent subchannels in a vertical 2×3 rod array channel / M. Sadatomi, A. Kawahara, K. Kano, [et al.] // International Journal of Multiphase Flow. – 2004. – Vol. 30. – № 5. – P. 481-498.
275. Rudzinski, K.F. Turbulent mixing for air-water flows in simulated rod bundle geometries / K.F. Rudzinski, K. Singh, C.C.S. Pierre // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – Vol. 50. – № 2. – P. 297-299.
276. Two-phase flow patterns in a four by four rod bundle / Y. Mizutani, A. Tomiyama, S. Hosokawa, [et al.] // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2007. – Vol. 44. – № 6. – P. 894-901.
277. Kaichiro, M. Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes / M. Kaichiro, M. Ishii // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1984. – Vol. 27. – № 5. – P. 723-737.
278. Substantiating the Reliability of Cooling the Core of VVER Reactors during Accidents Involving Loss of Tightness of the Reactor Coolant Circuit / B.F. Balunov, A.S. Babykin, A.A. Fal'kov, [et al.] // Thermal Engineering. – 2008. – Vol. 55. – № 1. – P. 31-38.
279. Flow structure of subcooled boiling water flow in a subchannel of 3 × 3 rod bundles / B.-J. Yun, G.-C. Park, J.E. Julia, [et al.] // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2008. – Vol. 45. – № 5. – P. 402-422.
280. Drift-flux model in a sub-channel of rod bundle geometry / J. Enrique Julia, T. Hibiki, M. Ishii, [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2009. – Vol. 52. – № 13–14. – P. 3032-3041.
281. Development of a subchannel void sensor and two-phase flow measurement in 10×10 rod bundle / T. Arai, M. Furuya, T. Kanai, [et al.] // International Journal of Multiphase Flow. – 2012. – Vol. 47. – № 0. – P. 183-192.

282. Experimental study of air–water two-phase flow in an  $8 \times 8$  rod bundle under pool condition for one-dimensional drift-flux analysis / S.-W. Chen, Y. Liu, T. Hibiki, [et al.] // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2012. – Vol. 33. – № 1. – P. 168-181.
283. Development of drift-flux model based on  $8 \times 8$  BWR rod bundle geometry experiments under prototypic temperature and pressure conditions / T. Ozaki, R. Suzuki, H. Mashiko, [et al.] // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2013. – Vol. 50. – № 6. – P. 563-580.
284. Hibiki, T. One-dimensional drift–flux model for two-phase flow in a large diameter pipe / T. Hibiki, M. Ishii // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2003. – Vol. 46. – № 10. – P. 1773-1790.
285. Experimental study of interfacial area transport in air–water two phase flow in a scaled  $8 \times 8$  BWR rod bundle / X. Yang, J.P. Schlegel, Y. Liu, [et al.] // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2013. – Vol. 50. – № 0. – P. 16-32.
286. Drift-flux correlation for rod bundle geometries / C. Clark, M. Griffiths, S.-W. Chen, [et al.] // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2014. – Vol. 48. – P. 1-14.
287. Hosokawa, S. Void distribution and bubble motion in bubbly flows in a  $4 \times 4$  rod bundle. Part I: Experiments / S. Hosokawa, K. Hayashi, A. Tomiyama // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2014. – Vol. 51. – № 2. – P. 220-230.
288. Air–water two-phase flow in a rolling  $3 \times 3$  rod bundle under stagnant condition / C. Yan, C. Yan, L. Sun, [et al.] // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2014. – Vol. 55. – P. 200-209.
289. Experimental and theoretical analysis of bubble rising velocity in a  $3 \times 3$  rolling rod bundle under stagnant condition / C. Yan, C. Yan, L. Sun, [et al.] // *Annals of Nuclear Energy*. – 2014. – Vol. 72. – P. 471-481.
290. Flow pattern map and multi-scale entropy analysis in  $3 \times 3$  rod bundle channel / Y. Zhou, Y. Hou, H. Li, [et al.] // *Annals of Nuclear Energy*. – 2015. – Vol. 80. – P. 144-150.
291. Wakamatsu, M. Attenuation of temperature fluctuations in thermal striping / M. Wakamatsu, H. Nei, K. Hashiguchi // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 1995. – Vol. 32. – № 8. – P. 752-762.
292. Rzezonka, B. Stress and fatigue analysis of SNR-300 mixing devices, including optimizations and thermal shock tests on internal structures / B. Rzezonka, H. Kastl, P. Schwellenbach // *Nuclear Engineering and Design*. – 1984. – Vol. 78. – № 1. – P. 69-78.

293. Simoneau, J. Applications of large eddy simulations in nuclear field / J. Simoneau, J. Champigny, O. Gelineau // *Nuclear Engineering and Design*. – 2010. – Vol. 240. – № 2. – P. 429-439.
294. Термографическое исследование турбулентных пульсаций воды при неизотермическом смешении / М.А. Большухин, И.А. Знаменская, Д.Н. Свешников, [и др.] // *Автометрия*. – 2014. – Т. 50. – № 5. – С. 75-83.
295. High-cycle thermal fatigue in mixing tees: large-eddy simulations compared to a new validation experiment / J. Westin, P. Veber, L. Andersson, [et al.] // *16th International Conference on Nuclear Engineering*. – American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2009. – P. 515-525.
296. Mahaffy, J. Synthesis of results for the Tee-junction benchmark / J. Mahaffy // *Computational fluid dynamics (CFD) for nuclear reactor safety applications*. – Bethesda, Maryland (United States), 2010. – P. 202-233.
297. Ayhan, H. CFD modeling of thermal mixing in a T-junction geometry using LES model / H. Ayhan, C.N. Sökmen // *Nuclear Engineering and Design*. – 2012. – Vol. 253. – P. 183-191.
298. Dehbi, A. Validation of the Langevin particle dispersion model against experiments on turbulent mixing in a T-junction / A. Dehbi, F. de Crécy // *Powder Technology*. – 2011. – Vol. 206. – № 3. – P. 312-321.
299. Verification and validation of Nek5000 for T-Junction, Matis , SIBERIA, and Max experiments / A. Obabko, P. Fischer, O. Marin, [et al.] // *Proc. Int. Topl. Mtg. Nuclear Reactor Thermal Hydraulics 2015 (NURETH 2015)*. – 2015. – P. 12.
300. CFD validation in OECD/NEA t-junction benchmark / A.V. Obabko, P.F. Fischer, T.J. Tautges, [et al.]. – Argonne National Lab. (ANL), Argonne, IL (United States), 2011.
301. Simulation of turbulent and thermal mixing in T-junctions using URANS and scale-resolving turbulence models in ANSYS CFX / Th. Frank, C. Lifante, H.-M. Prasser, [et al.] // *Nuclear Engineering and Design*. – 2010. – Vol. 240. – № 9. – P. 2313-2328.
302. Integral circulation experiment: thermal–hydraulic simulator of a heavy liquid metal reactor / M. Tarantino, P. Agostini, G. Benamati, [et al.] // *Journal of Nuclear Materials*. – 2011. – Vol. 415. – № 3. – P. 433-448.
303. McFarland, B.L. Turbulent mixing of two streams in a 90 tee / B.L. McFarland, D.G. Landy // *AIChE Symposium Series*. – 1980. – Vol. 76. – P. 351-358.

304. Maruyama, T. Pipeline mixing between two fluid streams meeting at a t-junction / T. Maruyama, S. Susuki, T. Mizushima // *Int. Chem. Eng.* – 1981. – Vol. 21. – P. 205-210.
305. Andreopoulos, J. Heat transfer measurements in a heated jet-pipe flow issuing into a cold cross stream / J. Andreopoulos // *Physics of Fluids*. – 1983. – Vol. 26. – № 11. – P. 3201-3210.
306. Sherif, S.A. Measurements of the thermal characteristics of heated turbulent jets in crossflow / S.A. Sherif, R.H. Pletcher // *Journal of Heat Transfer*. – 1989. – Vol. 111. – № 4. – P. 897-903.
307. Dynamics of fluid mixing induced at a T-junction. 3. Experimental characterization and fluid dynamic computation of temperature distribution in space / D.Y. Tang, J.J. Ou, R.H. Heist, [et al.] // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1993. – Vol. 32. – № 8. – P. 1727-1733.
308. Numerical and experimental study on turbulent thermal mixing in a T-junction flow / N. Fukushima, K. Fukagata, N. Kasagi, [et al.] // *The 6th ASME-JSME thermal engineering joint conference*. – 2003. – TED-AJ03-582. – P. 10.
309. Zughbi, H.D. Mixing in pipelines with side and opposed tees / H.D. Zughbi, Z.H. Khokhar, R.N. Sharma // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2003. – Vol. 42. – № 21. – P. 5333-5344.
310. Study on fluid mixing phenomena for evaluation of thermal stripping in a mixing tee / M. Igrashi, M. Tanaka, N. Kimura, [et al.] // [http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig\\_q=RN:36067327](http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:36067327) Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10). – Seoul, Korea, 2003. – P. 12.
311. Study on high-cycle fatigue evaluation for thermal striping in mixing tees with hot and cold water (3): type c; characteristics of temperature fluctuations and heat transfer in mixing tees with different pipe diameters / H. Noguchi, K. Tanimoto, Y. Kondo, [et al.] // *11th International conference on nuclear engineering : ICONE11-36376*. – Tokyo, Japan, 2003. – Vol. 2003. – P. 9.
312. Kimura, N. Experimental study on fluid mixing phenomena in T-pipe junction with upstream elbow / N. Kimura, H. Ogawa, H. Kamide // *Nuclear Engineering and Design*. – 2010. – Vol. 240. – № 10. – P. 3055-3066.
313. Hu, L.-W. LES benchmark study of high cycle temperature fluctuations caused by thermal striping in a mixing tee / L.-W. Hu, M.S. Kazimi // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2006. – Vol. 27. – № 1. – P. 54-64.



314. Wang, S.J. Three-dimensional analysis of flow and mixing characteristics of a novel in-line opposing-jet mixer / S.J. Wang, A.S. Mujumdar // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2007. – Vol. 46. – № 2. – P. 632-642.
315. Tilly, A. de. An experimental study of heat transfer in a two-dimensional T-junction operating at a low momentum flux ratio / A. de Tilly, J.M.M. Sousa // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2008. – Vol. 51. – № 3. – P. 941-947.
316. Study on mixing behavior in a tee piping and numerical analyses for evaluation of thermal striping / H. Kamide, M. Igarashi, S. Kawashima, [et al.] // *Nuclear Engineering and Design*. – 2009. – Vol. 239. – № 1. – P. 58-67.
317. Kuczaj, A.K. Large-Eddy Simulation study of turbulent mixing in a T-junction / A.K. Kuczaj, E.M.J. Komen, M.S. Loginov // *Nuclear Engineering and Design*. – 2010. – Vol. 240. – № 9. – P. 2116-2122.
318. Boyer, C. Measuring techniques in gas–liquid and gas–liquid–solid reactors : Jean-Claude Charpentier Festschrift Issue / C. Boyer, A.-M. Duquenne, G. Wild // *Chemical Engineering Science*. – 2002. – Vol. 57. – № 16. – P. 3185-3215.
319. Luo, R. Laminar light particle and liquid two-phase flows in a vertical pipe / R. Luo, X.H. Pan, X.Y. Yang // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2003. – Vol. 29. – № 4. – P. 603-620.
320. Vassallo, P. Near wall structure in vertical air–water annular flows / P. Vassallo // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1999. – Vol. 25. – № 3. – P. 459-476.
321. Study of hydrodynamic behaviour in bubble columns and external loop airlift reactors through analysis of pressure fluctuations / C. Vial, E. Camarasa, S. Poncin, [et al.] // *Chemical Engineering Science*. – 2000. – Vol. 55. – № 15. – P. 2957-2973.
322. Turbulence modification in bubbly upward pipe flow. Extraction of time resolved turbulent microscopic structure by high speed PIV / K. Yoshimura, D. Minato, Y. Sato, [et al.] // *Nippon Denetsu Shinpojiumu Koen Ronbunshu*. – 2004. – Vol. 41. – № 2. – P. 441-442.
323. Characterization of regimes and regime transitions in bubble columns by chaos analysis of pressure signals : Festschrift for Professor M. M. Sharma / H.M. Letzel, J.C. Schouten, R. Krishna, [et al.] // *Chemical Engineering Science*. – 1997. – Vol. 52. – № 24. – P. 4447-4459.
324. Hibiki, T. Measurement of radial void fraction distribution of two-phase flow in a metallic round tube using neutrons as microscopic probes / T. Hibiki, K. Mishima, H. Nishihara //

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1997. – Vol. 399. – № 2–3. – P. 432-438.

325. Hydrodynamics of an airlift reactor: Experiments and modeling / H. Dhaouadi, S. Poncin, J.M. Hornut, [et al.] // Chemical Engineering Science. – 1996. – Vol. 51. – № 11. – P. 2625-2630.

326. Image processing techniques for the measurement of two-phase bubbly pipe flows using particle image and tracking velocimetry (PIV/PTV) / R.F.L. Cerqueira, E.E. Paladino, B.K. Ynumaru, [et al.] // Chemical Engineering Science. – 2018. – Vol. 189. – P. 1-23.

327. Poletaev, I. Bubble patterns recognition using neural networks: Application to the analysis of a two-phase bubbly jet / I. Poletaev, M.P. Tokarev, K.S. Pervunin // International Journal of Multiphase Flow. – 2020. – Vol. 126. – P. 103194.

328. Hassan, Y.A. Three-dimensional measurements of single bubble dynamics in a small diameter pipe using stereoscopic particle image velocimetry / Y.A. Hassan, J. Ortiz-Villafuerte, W.D. Schmidl // International Journal of Multiphase Flow. – 2001. – Vol. 27. – № 5. – P. 817-842.

329. Experimental investigation of the velocity field induced by a Taylor bubble rising in stagnant water / R. van Hout, A. Gulitski, D. Barnea, [et al.] // International Journal of Multiphase Flow. – 2002. – Vol. 28. – № 4. – P. 579-596.

330. Durst, F. Principles and practice of laser-Doppler anemometry / F. Durst, A. Melling, J.H. Whitelaw // NASA STI/Recon Technical Report A. – 1976. – Vol. 76.

331. Дубнищев, Ю. Методы лазерной доплеровской анемометрии / Ю. Дубнищев, Б. Ринкевичюс. – М.: Наука. – 1982. – 302 с.

332. Influence of gas distribution and regime transitions on liquid velocity and turbulence in a 3-D bubble column / C. Vial, R. Lainé, S. Poncin, [et al.] // Chemical Engineering Science. – 2001. – Vol. 56. – № 3. – P. 1085-1093.

333. Sommerfeld, M. Detailed measurements in a swirling particulate two-phase flow by a phase-Doppler anemometer / M. Sommerfeld, H.-H. Qiu // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 1991. – Vol. 12. – № 1. – P. 20-28.

334. Qiu, H.H. High-resolution data processing for phase-Doppler measurements in a complex two-phase flow / H.H. Qiu, M. Sommerfeld, F. Durst // Measurement Science and Technology. – 1991. – Vol. 2. – № 5. – P. 455-463.

335. Bachalo, W.D. Experimental methods in multiphase flows / W.D. Bachalo // International Journal of Multiphase Flow. – 1994. – Vol. 20. – P. 261-295.

336. Comparative hydrodynamics study in a bubble column using computer-automated radioactive particle tracking (CARPT)/computed tomography (CT) and particle image velocimetry (PIV) / J. Chen, A. Kemoun, M.H. Al-Dahhan, [et al.] // Chemical Engineering Science. – 1999. – Vol. 54. – № 13. – P. 2199-2207.
337. Application of electrical resistance tomography to interrogate mixing processes at plant scale : Process Tomography / R. Mann, F.J. Dickin, M. Wang, [et al.] // Chemical Engineering Science. – 1997. – Vol. 52. – № 13. – P. 2087-2097.
338. Cross-sectional distributions of gas and solid holdups in slurry bubble column investigated by ultrasonic computed tomography / Warsito, M. Ohkawa, N. Kawata, [et al.] // Chemical Engineering Science. – 1999. – Vol. 54. – № 21. – P. 4711-4728.
339. Jones, O.C. Transient and statistical measurement techniques for two-phase flows: A critical review / O.C. Jones, J.-M. Delhayе // International Journal of Multiphase Flow. – 1976. – Vol. 3. – № 2. – P. 89-116.
340. Cartellier, A. Local phase detection probes in fluid/fluid two-phase flows / A. Cartellier, J.L. Achard // Review of Scientific Instruments. – 1991. – Vol. 62. – № 2. – P. 279-303.
341. Cartellier, A. Simultaneous void fraction measurement, bubble velocity, and size estimate using a single optical probe in gas-liquid two-phase flows / A. Cartellier // Review of Scientific Instruments. – 1992. – Vol. 63. – № 11. – P. 5442-5453.
342. Электродиффузионный метод исследования локальной структуры турбулентных течений / А.П. Бурдуков, П.И. Гешев, О.Н. Кашинский, [и др.]. – Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1986. – 247 с.
343. Approximate calculations of averaged hydrodynamic values and investigation of turbulent processes in channels / V.I. Subbotin, M.K. Ibragimov, P.A. Ushakov, [et al.] // International Heat Transfer Conference 4. – Begel House Inc., 1970.
344. Voj, P. Druckverlustmessungen und Abstandshaltergittern für SNR-300-Brennelement / P. Voj, K. Scholven // Techischer Bericht ITB 74.34. – 1974.
345. Гидродинамика и теплообмен в атомных станциях (основы расчета) / В.И. Субботин, М.Х. Ибрагимов, П.А. Ушаков, [и др.]. – М.: Атомиздат, 1975. – 408 с.
346. Cigarini, M. Thermohydraulic optimization of homogeneous and heterogeneous advanced pressurized water reactors / M. Cigarini, M. Dalle Donne // Nuclear Technology. – 1988. – Vol. 80. – № 1. – P. 107-132.

347. Proposal for pressure drop prediction for a fuel bundle with grid spacers using Rehme pressure drop correlations / M. Schikorr, E. Bubelis, L. Mansani, [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2010. – Vol. 240. – № 7. – P. 1830-1842.
348. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/ Под ред. М. О. Штейнберга.— 3-е изд., перераб. и доп. / И.Е. Идельчик. – М.; Машиностроение, 1992. – 672 с.
349. Кириллов, П.Л. Теплофизические свойства материалов ядерной техники : Учебное пособие для студентов специальности 10.10 АЭУ / П.Л. Кириллов, М.И. Терентьева, Н.Б. Денискина. – ГНЦ РФ ФЭИ. – Институт тепломассообменных процессов в ядерных энергетических установках Обнинск, 2005. – 182 с.
350. Weisman, J. Heat transfer to water flowing parallel to tube bundles / J. Weisman // Nuclear Science and Engineering. – 1959. – Vol. 6. – № 1. – P. 78-79.
351. Yao, S.C. Heat-transfer augmentation in rod bundles near grid spacers / S.C. Yao, L.E. Hochreiter, W.J. Leech // Journal of Heat Transfer. – 1982. – Vol. 104. – № 1. – P. 76-81.
352. Miller, D.J. On the development of a grid-enhanced single-phase convective heat transfer correlation / D.J. Miller, F.B. Cheung, S.M. Bajorek // Nuclear Engineering and Design. – 2013. – Vol. 264. – P. 56-60.
353. Tanase, A. An experimental investigation on the effects of flow obstacles on single phase heat transfer / A. Tanase, D.C. Groeneveld // Nuclear Engineering and Design. – 2015. – Vol. 288. – P. 195-207.
354. Распределение скорости жидкости в экспериментальной модели тепловыделяющей сборки с дистанционирующей решеткой / О.Н. Кашинский, Д.В. Куликов, П.Д. Лобанов, [и др.]. – 2018. – Т. 25. – № 2. – С. 227-231.
355. Динамика газовой фазы в имитаторе тепловыделяющей сборки с дистанционирующей решеткой / О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, А.С. Курдюмов, [и др.] // Письма В Журнал Технической Физики. – 2013. – Т. 39. – № 14. – С. 62-68.
356. Опускное пузырьковое течение при малых расходных газосодержаниях / О.Н. Кашинский, В.В. Рандин, П.Д. Лобанов, [и др.]. – 2004. – Т. 11. – № 4. – С. 619-624.
357. Влияние дисперсности газовой фазы на характеристики опускного пузырькового течения / О.Н. Кашинский, В.В. Рандин, П.Д. Лобанов, [и др.]. – 2005. – Т. 12. – № 4. – С. 637-643.

358. Hydrodynamics and heat transfer in an inclined bubbly flow / A.V. Chinak, A.E. Gorelikova, O.N. Kashinsky, [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 118. – P. 785-801.
359. Armand, A.A. Pressure drop in a two-phase flow in horizontal pipes / A.A. Armand // *Vsesoyuznogo Teplotekh. Inst.* – 1946. – Vol. 1. – P. 16-23.
360. Keirbulck, L. Statistical properties of wall shear stress fluctuations in turbulent channel flows / L. Keirbulck, L. Labraga, M. Gad-el-Hak // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2012. – Vol. 37. – P. 1-8.
361. Chinak, A.V. Power spectrum of tangential stress on a wall in a turbulent flow / A.V. Chinak // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 1994. – Vol. 67. – № 5-6. – P. 1026-1030.
362. Formation of the finely dispersed gas phase in upward and downward fluid flows / M.A. Vorob'ev, O.N. Kashinskii, P.D. Lobanov, [et al.] // *Fluid Dynamics*. – 2012. – Vol. 47. – № 4. – P. 494-500.
363. Структура турбулентного пузырькового потока и теплообмен в вертикальной трубе / П.Д. Лобанов, М.А. Пахомов, В.И. Терехов, [и др.]. – 2020. – Т. 27. – № 4. – С. 593-600.
364. Structure of a turbulent bubbly flow and heat transfer in a vertical tube / P.D. Lobanov, M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov, [et al.] // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2020. – Vol. 27. – № 4. – P. 565-571.
365. Lobanov, P.D. Wall shear stress and heat transfer of downward bubbly flow at low flow rates of liquid and gas / P.D. Lobanov // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2018. – Vol. 27. – № 2. – P. 232-244.
366. Souhar, M. Some turbulence quantities and energy spectra in the wall region in bubble flows / M. Souhar // *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*. – 1989. – Vol. 1. – № 9. – P. 1558-1565.
367. Effect of bubbles on turbulent kinetic energy transport in downward flow measured by time-resolved PTV / J. Lelouvetel, M. Nakagawa, Y. Sato, [et al.] // *Experiments in Fluids*. – 2011. – Vol. 50. – № 4. – P. 813-823.
368. Experimental study of the friction stress and true gas content in upward bubbly flow in a vertical tube / O.N. Kashinskii, L.S. Timkin, R.S. Gorelik, [et al.] // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2006. – Vol. 79. – № 6. – P. 1117-1129.

369. Dulin, V.M. The optical principles of PFBI approach / V.M. Dulin, D.M. Markovich, K.S. Pervunin // AIP Conference Proceedings The 7th international symposium on measurement techniques for multiphase flows. – AIP Publishing, 2012. – Vol. 1428. – P. 217-224.

370. The effect of gas bubbles on the flow structure and turbulence in a downward two-phase flow in a vertical pipe / I.A. Evdokimenko, P.D. Lobanov, M.A. Pakhomov, [et al.] // Journal of Engineering Thermophysics. – 2020. – Vol. 29. – № 3. – P. 414-423.

371. Lobanov, P.D. Experimental and numerical study of heat transfer enhancement in a turbulent bubbly flow in a sudden pipe expansion / P.D. Lobanov, M.A. Pakhomov // Journal of Engineering Thermophysics. – 2017. – Vol. 26. – № 3. – P. 377-390.

372. Lobanov, P. Experimental and numerical study of the flow and heat transfer in a bubbly turbulent flow in a pipe with sudden expansion / P. Lobanov, M. Pakhomov, V. Terekhov // Energies. – 2019. – Vol. 12. – № 14. – P. 2735.

373. Planar fluorescence for round bubble imaging and its application for the study of an axisymmetric two-phase jet / Y.K. Akhmetbekov, S.V. Alekseenko, V.M. Dulin, [et al.] // Experiments in Fluids. – 2010. – Vol. 48. – № 4. – P. 615-629.

374. Regimes of formation of bubbly flows / O.N. Kashinsky, M.A. Vorobyev, P.D. Lobanov, [et al.] // International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE / DOI: 10.1115/ICONE24-60628. – 2016. – Vol. 3.

375. Local characteristics of upward gas-liquid flows / V.E. Nakoryakov, O.N. Kashinsky, A.P. Burdukov, [et al.] // International Journal of Multiphase Flow. – 1981. – Vol. 7. – № 1. – P. 63-81.

376. Timkin, L.S. Specificity of laminar-turbulent transition in upward monodispersed microbubbly flow / L.S. Timkin, R.S. Gorelik // Technical Physics Letters. – 2010. – Vol. 36. – № 6. – P. 493-495.

377. Pakhomov, M.A. Second moment closure modelling of flow, turbulence and heat transfer in droplet-laden mist flow in a vertical pipe with sudden expansion / M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – Vol. 66. – P. 210-222.

378. Pakhomov, M.A. Modeling of the flow patterns and heat transfer in a turbulent bubbly polydispersed flow downstream of a sudden pipe expansion / M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 101. – P. 1251-1262.

379. Local heat transfer downstream of an abrupt expansion in a circular channel with constant wall heat flux / J.W. Baughn, M.A. Hoffman, R.K. Takahashi, [et al.] // *Journal of Heat Transfer*. – 1984. – Vol. 106. – № 4. – P. 789-796.
380. Terekhov, V.I. Aerodynamics and heat transfer in a separated flow in an axisymmetric diffuser with sudden expansion / V.I. Terekhov, T.V. Bogatko // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2015. – Vol. 56. – № 3. – P. 471-478.
381. Hishida, K. Augmentation of convective heat transfer by an effective utilization of droplet inertia / K. Hishida, T. Nagayasu, M. Maeda // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1995. – Vol. 38. – № 10. – P. 1773-1785.
382. Кашинский, О.Н. Гидродинамическая структура и теплообмен восходящего пузырькового течения в кольцевом канале / О.Н. Кашинский, А.С. Курдюмов, П.Д. Лобанов. – 2010. – Т. 9. – С. 411-415.
383. Кашинский, О.Н. Локальные характеристики восходящего пузырькового течения в кольцевом канале / О.Н. Кашинский, А.С. Курдюмов, П.Д. Лобанов. – 2011. – Т. 18. – № 1. – С. 41-45.
384. Исследование структуры зоны трехмерных возмущений однофазного потока в кольцевом канале с частичным перекрытием сечения / О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, А.С. Курдюмов, [и др.] // *Теплоэнергетика*. – 2013. – № 5. – С. 41-45.
385. Performance of electrochemical probes for local void fraction measurement in air-water flows / L.S. Timkin, N. Rivière, A. Cartellier, [et al.] // *Review of Scientific Instruments*. – 2003. – Vol. 74. – № 8. – P. 3784-3786.
386. Hasan N. Oguz, A.P. Dynamics of bubble growth and detachment from a needle / A.P. Hasan N. Oguz // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1993. – Vol. 257. – P. 111-145.
387. Experimental Simulation of Hydrodynamics and Heat Transfer in Bubble and Slug Flow Regimes in a Heavy Liquid Metal / E.V. Usov, P.D. Lobanov, A.E. Kutlimetov, [et al.] // *Thermal Engineering*. – 2018. – Vol. 65. – № 8. – P. 562-567.
388. Numerical simulation of gas volume motion during the gas injection into liquid metal coolant / E.V. Usov, P.D. Lobanov, N.A. Pribaturin, [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 899. – P. 032024.

389. Some approaches to numerical modelling of a phenomenon observed during steam generator tube rupture in the reactor with liquid metal coolant / E.V. Usov, P. Lobanov, O.N. Kashinskiy, [et al.] // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 115. – P. 06007.
390. Экспериментальные исследования импульсного впрыска газа в жидкость и верификация на основе полученных данных системного теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM / П.Д. Лобанов, Э.В. Усов, А.А. Бутов, [и др.] // Теплоэнергетика. – 2017. – № 10. – С. 79-86.
391. Numerical simulation of gas volume motion during the gas injection into liquid metal coolant / E.V. Usov, P.D. Lobanov, N.A. Pribaturin, [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 899. – № 3. – P. 032024.
392. Experimental investigation of the impulse gas injection into liquid and the use of experimental data for verification of the HYDRA-IBRAE/LM thermohydraulic code / P.D. Lobanov, E.V. Usov, A.A. Butov, [et al.] // Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 64. – № 10. – P. 770-776.
393. Кашинский, О.Н. Трение на стенке при обтекании газового снаряда опускным потоком жидкости / О.Н. Кашинский, А.С. Курдюмов, П.Д. Лобанов. – 2008. – Т. 14. – № 1. – С. 93-98.
394. Кашинский, О.Н. Возмущение нисходящего потока жидкости стационарным газовым снарядом / О.Н. Кашинский, А.С. Курдюмов, П.Д. Лобанов // Известия Российской Академии Наук. Механика Жидкости И Газа. – 2010. – № 4. – С. 88-96.
395. Nigmatulin, T.R. Surface of a Taylor bubble in vertical cylindrical flows / T.R. Nigmatulin // Doklady Physics. – 2001. – Vol. 46. – № 11. – P. 803-805.
396. Nigmatulin, T.R. Shape of Taylor bubbles in vertical tubes / T.R. Nigmatulin, F.J. Bonetto // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 1997. – Vol. 24. – № 8. – P. 1177-1185.
397. Nusselt, W. Die oberflächenkondensation des wasserdampfes / W. Nusselt // Z. VDI. – 1916. – № 60. – P. 541-546, 569-575.
398. Tihon, J. Wall shear stress induced by a large bubble rising in an inclined rectangular channel / J. Tihon, V. Pěnkavová, J. Vejražka // International Journal of Multiphase Flow. – 2014. – Vol. 67. – № Supplement C. – P. 76-87.



399. Johnson, M.W. Statistical properties of turbulent bursts in transitional boundary layers / M.W. Johnson, A. Fashifar // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 1994. – Vol. 15. – № 4. – P. 283-290.
400. Liberzon, D. Upward-propagating capillary waves on the surface of short Taylor bubbles / D. Liberzon, L. Shemer, D. Barnea // *Physics of Fluids (1994-present)*. – 2006. – Vol. 18. – № 4. – P. 048103.
401. Моделирование течения жидкометаллического теплоносителя в Т-образном смесителе / О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, А.С. Курдюмов, [и др.]. – 2016. – Т. 23. – № 3. – С. 395-398.
402. Экспериментальное моделирование течения жидкометаллического теплоносителя в Т-образном смесителе / О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, А.С. Курдюмов, [и др.] // *Журнал Технической Физики*. – 2016. – Т. 86. – № 5. – С. 145-148.
403. Экспериментальное исследование смешения потоков жидкости с различной температурой в тройниковом соединении / Л.А. Большов, Н.А. Прибатурин, О.Н. Кашинский, [и др.]. – 2020. – Т. 61. – № 3. – С. 63-73.

## Приложение А: Внедрение результатов работы



ОКБМ  
АФРИКАНТОВ  
РОСАТОМ

ОРГАНИЗАЦИЯ АО «АТОМЭНЕРГОМАШ»  
Акционерное общество  
«Опытное Конструкторское Бюро  
Машиностроения  
имени И. И. Африкантова»  
(АО «ОКБМ Африкантов»)

Буриковский проезд, д. 15,  
г. Нижний Новгород, 603074

Почтовый адрес:

Бокс № 772, Нижний Новгород, 603950  
Телефон (831) 275-26-40, факс (831) 241-87-72

E-mail: okbm@okbm.nnov.ru

ОКПО 08624579, ОГРН 1085259006117

ИНН 5259077666, КПП 525901001

ФГБУН Институт теплофизики  
им. С.С. Кутателадзе СО РАН  
630090, г. Новосибирск,  
пр. Ак. Лаврентьева, 1  
Диссертационный совет 24.1.129.01

10.11.2021 № 41-11.2/26044-56

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Об использовании результатов

### Справка

о практическом использовании и внедрении результатов диссертационной  
работы

Лобанова Павла Дмитриевича

АО «ОКБМ Африкантов» предоставляет настоящую справку о том, что с использованием работ по локальной теплогидравлике теплоносителя в элементах реакторных установок различного типа, выполненных в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН и вошедших в диссертационную работу Лобанова П.Д. «Экспериментальное моделирование локальной гидродинамики и теплообмена в элементах ядерных энергетических установок» на соискание ученой степени доктора технических наук, в АО «ОКБМ Африкантов» выполняются экспериментальные исследования взаимного влияния гидродинамики и вибрации конструкций. Применение экспериментальных данных и связанных вычислений позволяет на качественно новом уровне оптимизировать конструкцию реакторной установки на этапе проектирования для обеспечения улучшенных ресурсных характеристик элементов оборудования.

На базе этих исследований АО «ОКБМ Африкантов» в рамках сотрудничества с Агентством по Атомной Энергетике ОЭСР подготовлен международный бенчмарк (прецизионный эксперимент). Целью бенчмарка является создание расчетной технологии анализа вибронегрузки конструкций реакторной установки потоком теплоносителя на базе методов решения двусторонне связанной трехмерной задачи гидродинамики и динамики элементов РУ. Для достижения цели требуются прецизионные экспериментальные данные.

Обеспечение достоверной информации о локальных осредненных по времени и пульсационных значениях параметров течения, о распределении компонент скорости жидкости и спектральных характеристиках скорости за счет применения комплекса современных систем измерений является отличительной особенностью выполненного бенчмарка.

В настоящее время выполнен первый этап бенчмарка, по результатам которого экспериментальные данные открытых тестов направлены международной команде участников. Обсуждение открытых тестов бенчмарка состоялось, в частности, на специализированной сессии авторитетной международной конференции CFD4NRS-8, прошедшей в ноябре 2020 года, где представленные результаты получили высокую оценку участников.

Первый заместитель генерального  
директора - генерального  
конструктора



В.В.Петрунин



ОКБ  
ГИДРОПРЕСС  
РОСАТОМ

ОРГАНИЗАЦИЯ АО «АТОМЭНЕРГОМАШ»

**Акционерное общество  
«Ордена Трудового Красного Знамени  
и ордена труда ЧССР опытное  
конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС»  
(АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»)**

ул. Орджоникидзе, д. 21, г. Подольск,  
Московская область, 142103  
Телефон (495) 502-79-20, (495) 502-79-10,  
факс (4967) 69-97-83, (4967) 54-25-16  
E-mail: grpress@grpress.podolsk.ru  
ОКПО 08624607, ОГРН 1085074009503  
ИНН 5036092340, КПП 503601001

ФГБУН Институт теплофизики им.  
С.С. Кутателадзе  
Диссертационный совет 24.1.129.01  
630090, г. Новосибирск, пр.  
Лаврентьева, 1  
no e-mail: dissovet@itp.nsc.ru

15.11.2021 № 044-0-2.02-01/ 21568

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Об использовании результатов  
диссертационной работы

Результаты экспериментальных работ по локальной гидродинамике водяного теплоносителя в ТВС с дистанционирующими и перемешивающими решетками разных типов, выполненных в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН и вошедших в диссертационную работу П.Д. Лобанова «Экспериментальное моделирование локальной гидродинамики и теплообмена в элементах ядерных энергетических установок» на соискание ученой степени доктора технических наук, являются важными для понимания закономерностей течения теплоносителя при повышенных тепловых нагрузках и возможностей для увеличения мощности реакторных установок.

Актуальными являются данные по распределениям компонент скорости жидкости, напряжению трения по периметру имитатора твэла, двухфазному течению в каналах ТВС с учетом влияния дистанционирующих решеток. Эти данные были использованы для обоснования принимаемых конструкторских решений и методик расчета, а также для верификации программ расчета локальных параметров течения теплоносителя в ТВС.

Генеральный конструктор



В.А. Пиминов





Б. Тульская ул., 52, Москва, 115191 - тел: (495) 955 22 55, факс: (495) 955 11 51  
pbi@ibrae.ac.ru, www.ibrae.ac.ru • ОГРН 1027700198468, ИНН 7726077310, КПП 772601001

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО  
РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**16 НОЯ 2021** № **1140401-1463**

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

В Диссертационный совет 24.1.129.01  
630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1  
ИТ СО РАН  
E-mail: dissovvet@itp.nsc.ru

**СПРАВКА**

о практическом использовании результатов диссертации Лобанова П.Д.  
«Экспериментальное моделирование локальной гидродинамики и теплообмена в  
элементах ядерных энергетических установок»

Результаты экспериментальных исследований, содержащиеся в диссертации на соискание степени доктора технических наук Лобанова П.Д. «Экспериментальное моделирование локальной гидродинамики и теплообмена в элементах ядерных энергетических установок», были использованы в ИБРАЭ РАН для валидации кодов нового поколения, разрабатываемых для обоснования безопасности ядерных реакторов в рамках проекта «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв», реализуемого Госкорпорацией «Росатом».

В частности, результаты экспериментов по «захолаживанию» тяжелого жидкометаллического теплоносителя при его взаимодействии с парогазовым потоком и эволюции газовых пузырьков, в которых моделировались процессы при межконтурной течи парогенератора реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем, использованы для уточнения моделей (карт режимов течения и теплообмена и замыкающих соотношений) и валидации системного теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM. Указанные результаты позволили аттестовать код HYDRA-IBRAE/LM для моделирования процессов транспорта и теплообмена водяного пара с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем.

Результаты по закономерностям локальных течений в ТВС, перемешиванию потоков модельного тяжелого жидкометаллического теплоносителя с разной температурой использованы для валидации отечественного CFD кода CONV-3D (LES и DNS).

Научный руководитель  
Академик РАН



Л.А. Большов

Исп.  
Тел./ Факс: