

На правах рукописи

Евдокименко Илья Анатольевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И
ТЕПЛОМАССОБМЕНА ОТРЫВНЫХ ПУЗЫРЬКОВЫХ
ПОТОКОВ**

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), г. Новосибирск

Научный доктор технических наук
руководитель: Лобанов Павел Дмитриевич

Официальные Галимзянов Марат Назипович — доктор физико-математических
оппоненты: наук, Федеральное государственное бюджетное научное
учреждение Уфимский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук (УФИЦ РАН), директор Института
механики им. Р.Р. Мавлютова — обособленного структурного
подразделения Федерального государственного бюджетного
научного учреждения УФИЦ РАН

Васильев Николай Викторович — кандидат физико-
математических наук, Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Объединенный институт высоких температур
Российской академии наук, заведующий лабораторией
теплообмена в энергетических установках

Ведущая Федеральное государственное автономное образовательное
организация: учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет»

Защита состоится «6» мая 2026 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01, созданного на базе ИТ СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИТ СО РАН: www.itp.nsc.ru. Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1. (e-mail: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан «__» марта 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор РАН

Терехов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Введение

Получение чистой энергии, снижение выбросов CO_2 является одним из ключевых направлений в государственной энергетической стратегии. Двухфазные газожидкостные потоки играют значимую роль в промышленности, энергетике, химической технологии и биотехнологии. В частности, развитие биотехнологий в Российской Федерации является одним из приоритетных научно-технических направлений по ряду ключевых причин, охватывающих экономические, социальные, медицинские, экологические и стратегические аспекты.

Системы, в которых газ принимает форму пузырей активно применяются при создании высокоэффективного оборудования. Несмотря на обширные исследования, понимание закономерностей двухфазных пузырьковых течений остается неполным. Такие потоки часто являются турбулентными со значительным межфазным взаимодействием между несущей жидкой фазой и пузырьками. Они могут осложняться различными процессами и явлениями, такими как: слияние пузырьков, полидисперсность газовой фазы, фрагментация, взаимодействие пузырьков с турбулентными структурами и т. д., что в свою очередь оказывает влияние на тепло- и массообмен. Возможность управления интенсивностью процессов в различных технологических приложениях позволяет повысить эффективность промышленных технологий. Одним из способов такого контроля является регулирование параметров дисперсной фазы (размерами, распределением и скоростями движения пузырей) в газожидкостном течении.

Управление локальными гидродинамическими параметрами течения является перспективным способом интенсификации процессов тепло- и массообмена. Для изменения структуры течения могут применяться элементы, которые повышают или снижают степень турбулентности потока. К устройствам, увеличивающим турбулентность потока относят пассивные завихрители. Их особенность заключается в отсутствии необходимости подвода энергии извне для изменения гидродинамической структуры потока. Пассивные завихрители-интенсификаторы бывают различной формы: преграды, спирали, ребра, перфорированные пластины. Форма завихрителя оказывает существенное влияние на структуру потока и может привести к отрыву потока в некоторых частных случаях. Наличие отрыва течения является причиной образования сложных гидродинамических структур, что вызывает сложности при её математическом моделировании.

С конца прошлого века интерес к исследованию отрывных потоков возрос из-за возможности их математического моделирования, связанной с развитием вычислительных

методов (LES, DNS) и необходимостью верификации разрабатываемых кодов. Рециркуляционное движение, образующееся при отрыве потока, во многом определяет структуру турбулентного течения и оказывает существенное влияние на интенсивность переноса импульса, массы и теплопереноса, что усложняет численные исследования таких течений. За счет интенсивного образования вихрей в зоне отрыва потока происходит значительная интенсификация процессов теплообмена.

Несмотря на большое количество работ по исследованию отрывных течений, ряд вопросов по-прежнему остается открытым даже для однофазных течений, а количество работ по двухфазным течениям сильно ограничено. Большое количество работ посвящено исследованию эффектов установки интенсификаторов в барботажные реакторы на массообмен при различных параметрах газовой фазы. Подобные работы не имеют систематического характера и исследуют лишь частные случаи, ограниченные областью применения. В то же время, информации о процессах переноса в пузырьковых течениях в каналах с завихрителями в литературе практически не содержится и совместный эффект влияния введения газовой фазы и интенсификаторов в поток не рассматривался.

В связи со сказанным, проведение экспериментальных исследований отрывных пузырьковых потоков необходимо для получения эмпирической базы о гидродинамической структуре и процессах переноса тепла и массы в дисперсных течениях. Полученная информация может лечь в основу разработки современных методов расчета двухфазных течений.

Целью работы является оптимизация методов управления процессами тепло- и массообмена в пузырьковых реакторах с помощью легко обслуживаемых интенсификаторов без механических элементов и внешнего подвода энергии.

Задачи:

1. Определить особенности влияния формы и расположения преград-интенсификаторов на интегральные гидродинамические параметры в барботажном реакторе;
2. На основе изменения расположения преград-интенсификаторов провести экспериментальные исследования для определения способов интенсификации объемного коэффициента массообмена «газ-жидкость» в барботажном реакторе;
3. Провести экспериментальное исследование локальной гидродинамической структуры и теплообмена восходящего двухфазного потока в вертикальном канале с различными способами организации отрывных течений;
4. Выявить закономерности влияния конструкции рабочего участка с точки зрения интенсификации теплоотдачи от нагреваемой стенки к восходящему двухфазному

потоку, с учетом локальных и интегральных параметров течения при разных соотношениях расходов жидкой и газовой фаз.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы определяется полученными оригинальными результатами исследований:

- Впервые получены данные по управлению интегральными параметрами барботажных реакторов с помощью преград-интенсификаторов при сужении поперечного сечения канала до 60%. Установлены закономерности влияния расположения преград и их формы на интенсификацию тепломассообменных процессов и изменение режимов двухфазного течения в реакторе при разной начальной дисперсности газа. Параллельное парное расположение преград интенсифицирует коалесценцию пузырей из-за сужения проходного сечения, применение непарных преград улучшает перемешивание двухфазной среды, преграды-интенсификаторы с сечением в виде равнобокой трапеции препятствуют коалесценции пузырей и увеличивают межфазную поверхность «газ – жидкость»;
- Получены объемные коэффициенты массообмена для барботажного реактора с преградами-интенсификаторами. Установка преград-интенсификаторов приводит к увеличению коэффициента массообмена за счет изменения площади межфазного взаимодействия;
- Установлено, что комбинированный эффект от наличия дисперсной газовой фазы и создания отрыва двухфазного течения за преградами-интенсификаторами увеличивает интенсивность теплообмена в прямоугольном канале более чем в 2 раза по сравнению с однофазным потоком;
- На основе оригинальных экспериментальных данных показано, что двухфазные отрывные течения за преградой и за уступом в прямоугольном канале имеют качественно подобную между собой структуру, а введение пузырей сокращает их зону рециркуляции по сравнению с однофазным потоком.

Теоретическая и практическая значимость

Экспериментальное исследование совместного эффекта введения пузырей и создания отрыва потока позволяет усовершенствовать и верифицировать существующие математические модели для описания газожидкостных течений. Полученные в ходе данной работы новые знания об интегральных и локальных гидродинамических параметрах и их влиянию на тепломассообмен могут стать опорной информацией при проектировании и создании высокотехнологичных реакторов. Результаты данной работы могут активно применяться в различных промышленных приложениях, в частности в области

биотехнологических процессов. Экспериментальные данные о применении преград-интенсификаторов, закономерности их влияния на процессы переноса позволяют составить рекомендации для разработки как эффективных барботажных реакторов для культивирования микроводорослей, так и элементов энергетического оборудования.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных методов исследований, проведением калибровочных измерений, воспроизводимостью полученных экспериментальных данных. Используемые методы тестировались в однофазных потоках, а результаты сравнивались с известными корреляциями. Достоверность полученных данных обусловлена также публикацией результатов исследований в жестко рецензируемых научных журналах.

Положения, выносимые на защиту:

- Результаты экспериментального исследования гидродинамической структуры двухфазного потока и смены режимов газожидкостного течения в барботажном реакторе с преградами-интенсификаторами различной формы;
- Закономерности влияния завихрителей потока различной формы на объемные коэффициенты массообмена «газ-жидкость» в барботажном реакторе;
- Особенности эволюции локальной гидродинамической структуры двухфазного течения в зависимости от формы преград-интенсификаторов в прямоугольном канале при малых газосодержаниях в диапазоне чисел Рейнольдса по жидкой фазе от 5000 до 15000;
- Закономерности влияния формы одиночных преград-интенсификаторов на распределение коэффициента теплоотдачи от нагреваемой стенки к одно- и двухфазному потоку в прямоугольном канале при малых газосодержаниях в диапазоне чисел Рейнольдса по жидкой фазе от 5000 до 12500;
- Особенности влияния пузырей газа на интенсификацию теплоотдачи в прямоугольном канале с обратным уступом при малых газосодержаниях в диапазоне чисел Рейнольдса по жидкой фазе от 5000 до 12500.

Личный вклад

Основные научные результаты, представленные в диссертации и предлагаемые для защиты, были получены автором лично. Автор участвовал в проектировании и создании экспериментальных установок и испытательных стендов, подготовке и проведении всех экспериментов, описанных в работе, разработке и проверке комплекса методов анализа экспериментальных данных. Обработке и анализе результатов экспериментов, подготовке публикаций для рецензируемых журналов и докладов на научных конференциях.

Постановка задачи и основные методы исследования сформулированы руководителем диссертационной работы д.т.н. П.Д. Лобановым.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 110 страниц с 54 рисунками, 3 таблицами и 1 приложением. Список литературы содержит 164 наименования.

Апробация результатов

Основные положения и результаты работы представлены и получили одобрение на:

- Всероссийских конференциях XXXV, XXXVI, XXXVII, XXXIX, XL «Сибирский теплофизический семинар», 2019-2024, Новосибирск;
- XX Научно-технической конференции «НПО-2019», 2019, Новосибирск;
- XXII, XXV Школах-семинарах молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках», 2019-2025 г, Россия;
- V, VI, VII Всероссийских научных конференциях «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых, 2020-2023, Россия;
- Национальной конференции с международным участием «СибОптика. Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей», 2023-2024. Новосибирск;
- Минском Международном форуме по тепло- и массообмену, 2024, Минск, Республика Беларусь.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определена цель и поставлены задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** проведен обзор современного состояния исследований двухфазных пузырьковых течений. В параграфе 1.1 уделено внимание классификациям режимов течения двухфазных потоков. Одна из известных классификаций [Hetsroni, 1981] основана на концентрации газа в потоке жидкости и формы дисперсных включений. Параграф 1.2 посвящен экспериментальным и расчетным исследованиям гидродинамики и массообмена в барботажных реакторах. В работах [Manjrekar, 2019; Ruzicka, 2001] представлены 3 подвида пузырькового режима течения в барботажных реакторах: монодисперсный, переходный и полидисперсный. Переход от одного к другому тесно связан с истинным газосодержанием и приведенной скоростью газа. Подробный обзор о влиянии различных

характеристик (способа ввода газа, свойства жидкости) на смену режимов приведен в работе [Besagni, 2018]. Также в тексте диссертации приведены корреляции для прогнозирования истинного газосодержания в барботажных реакторах, основанные на физических свойствах жидкости, газа, а также геометрическом размере самого реактора. Тем не менее, многие из корреляций были получены экспериментально и требуют эмпирических коэффициентов, что лишает их универсальности для применения в реакторах со сложной геометрией.

Одним из способов управления интенсивностью процессов тепло- и массообмена является изменение гидродинамической структуры потока путем использования пассивных завихрителей (преграды, рёбра, уступы, стержни, дуги). Ряд работ посвящен исследованию влияния введения в канал различных геометрических элементов на характеристики потока. Показано, что введение таких элементов может приводить к росту истинного газосодержания как в монодисперсном режиме течения, так и в полидисперсном режиме течения, за счет улучшения перемешивания и турбулизации «мертвых» зон в канале [Zhao et al., 2018]. В то же время их установка может являться причиной запаздывания смены режимов [Guan and Yang, 2021].

С восьмидесятых годов прошлого столетия активно ведутся исследования по экспериментальному измерению объемного коэффициента массопереноса k_{La} в барботажных реакторах. Основными параметрами, которые влияют на величину k_{La} являются размер газовых пузырей, способ их ввода, площадь межфазной поверхности, физико-химические свойства среды. Наличие преград-интенсификаторов позволяет создать в реакторе различные схемы течения, что может усиливать взаимодействие пузырьков и становится причиной увеличения времени их пребывания в реакторе. В литературе показано, что присутствие преград увеличивает массоперенос в 3-4 раза по сравнению с классическим барботажным реактором [Zhao et al., 2018].

Параграф 1.3. посвящен исследованиям отрывных потоков в вертикальных каналах. В параграфе представлена общая информация об особенностях влияния газовых пузырей на гидродинамику и теплообмен в замкнутых системах. И несмотря на большое количество работ в этой области, ряд вопросов по-прежнему остается открытым.

В некоторых случаях установка преград-интенсификаторов может приводить к отрыву потока, что значительно осложняет структуру течения, и как следствие, оказывает влияние на процессы переноса. Одной из простейших конфигураций канала с отрывом потока является канал с обратным уступом. Основные исследования двухфазных потоков в таких каналах посвящены структуре потока, измерению перепада давления. Небольшая часть работ посвящена визуализации и исследованию таких гидродинамических параметров как

распределение скорости жидкости и газосодержания за обратным уступом. В работах [Aloui and Souhar, 1996] описана ассиметричность профилей скоростей жидкости, вызванная отрывом. Также в их работе приведены профили локального газосодержания, которые показывают, что максимальная величина локального газосодержания, наблюдается в области канала, где скорости пузырьков практически равны нулю из-за существующей вихревой структуры. Печеркиным Н. и Чеховичем В. было показано, что введение пузырей в поток может приводить к улучшению массообмена на стенке в трубе с внезапным расширением при малых расходах жидкой фазы [Pecherkin and Chekhovich, 2011].

В литературе также представлены исследования по изучению двухмерных преград в канале. В отличие от обратного уступа, наличие преград подразумевает собой наличие еще двух отрывных зон перед преградой. Основная часть этих работ посвящена однофазным течениям, а информация о пузырьковых потоках в канале с преградами крайне ограничена.

Теплообмен однофазных отрывных течений подробно рассмотрен в работах В.И. Терехова и коллег из ИТ СО РАН. Было показано, что сразу за преградой в канале наблюдается зона малоинтенсивного теплообмена. При удалении от преграды интенсивность теплообмена возрастает вплоть до достижения максимума, который соответствует точке присоединения, и после прохождения которого наблюдается плавное снижение коэффициента теплоотдачи вплоть до ее стабилизации, что соответствует зоне релаксации течения, где происходит образование нового пограничного слоя [Terekhov et al., 2003]. В то же время, одна из немногих работ по теплообмену двухфазных пузырьковых течений в трубе с внезапным расширением [Lobanov et al., 2019] показала, что введение пузырей в поток не меняет характер теплопереноса, но в то же время позволяет его улучшить в 3 раза по сравнению с однофазным потоком. Для каналов прямоугольного сечения такой информации в литературе автором диссертации найдено не было.

Несмотря на наличие работ по исследованию теплообмена пузырьковых потоков в различных каналах, ряд вопросов о совместном влиянии дисперсной фазы и отрыва потока на теплообмен по-прежнему остаётся открытым.

Глава 2 посвящена описанию экспериментальных методов, используемых в работе, достоверности и неопределенности полученных данных.

Для измерения истинного газосодержания в пузырьковой колонне использовался метод измерения статического давления в колонне на расстоянии между отборами давления $\Delta H=530$ мм. Перепад давления измерялся с частотой 50 Гц в течение 120 секунд. Неопределённость измерения газосодержания составила $\pm 0,3$ %. Переход от одного режима к другому определяется при изменении угла наклона кривой при построении $\varphi(U_G)$, $U_{swarm}(U_G)$, $j_{GL}(U_G)$.

Для оценки времени перемешивания в колонне использован кондуктометрический метод исследования. Этот метод основан на добавлении раствора NaCl в реактор и отслеживании изменения электропроводности раствора до стабилизации. Время перемешивания фиксируется при достижении раствором постоянной электропроводности с допустимыми флуктуациями $\pm 10\%$ от его максимального значения. Неопределенность при измерении времени перемешивания составила $\pm 8-10\%$.

Визуализация перемешивания обеспечивалась методом изменения цвета с помощью pH-чувствительного индикатора (1% спиртовой раствор фенолфталеина) путем его введения в канал через боковую стенку.

Объемный коэффициент массопереноса «газ-жидкость» (k_{La}) измерялся методом абсорбции-десорбции кислорода. Этот метод заключается в изучении вытеснения растворенного кислорода в реакторе на этапе десорбции с помощью инертного газа N_2 , а также растворением кислорода из воздуха на этапе абсорбции. Концентрация растворенного O_2 измеряется каждую секунду во время циклов абсорбции-десорбции. Неопределенность при оценке объемного коэффициента массообмена составляет $\pm 6\%$ от искомой величины.

Для измерения скорости жидкой фазы в прямоугольном вертикальном канале был использован метод цифровой трассерной визуализации (PIV). Описан принцип работы метода и приведена принципиальная схема измерений. Показано, что необходимое количество изображений для измерения скорости жидкости в двухфазном потоке составляет не менее 4000 кадров. Неопределенность при измерении скорости при этом составляет не более 5%.

Для определения дисперсности газовой фазы в потоке при малых газосодержаниях, пузырьковое течение снималось на цифровую камеру в проходящем свете. Полученные теневые изображения обрабатывались автоматически при помощи ПО DANTEC DYNAMICS©. Скорость всплытия пузырей в реакторе определялась при помощи алгоритма, основанного на корреляционном анализе изображений. Точность определения диаметра пузыря лежит в области $\pm 0,2$ мм, а ошибка при измерении скорости составляет не более $\pm 0,03$ м/с.

Описана методика измерения теплообмена в газожидкостном потоке в прямоугольном канале с преградой/обратным уступом при обогреваемой стенке канала с помощью скоростной термографии. Неопределенность при определении числа Нуссельта составляет $\pm 7-10\%$.

В главе 3 подробно рассмотрено влияние преград-интенсификаторов на смену режимов, время перемешивания и массообмен в пузырьковой колонне. В разделе 3.1 описан

экспериментальный стенд, рабочая секция которого представляет собой оргстеклянный канал прямоугольного сечения с размерами 800x200x50 мм. Схема стенда приведена на рисунке 1. Также в главе приводятся 15 различных вариантов установки преград-интенсификаторов прямоугольной («R») и трапециевидной («Т») формы с размерами 40x10 мм., которые представлены на рисунке 1б. Эксперимент проводился при начальном уровне рабочей жидкости в колонне, равным $H_0=550$ мм. Диапазон приведенных скоростей газа $U_G=0-0,08$ м/с. Введение преграды в канал изменяет локально поперечное сечение и создает зону сужения. Таким образом коэффициент сужения при непарном расположении преград $CR = \frac{H_c - H}{H_c} = 0,8$, (R, T=1;3), и для парного расположения преград $CR = \frac{H_c - 2H}{H_c} = 0,6$ (R, T=2;4;6).

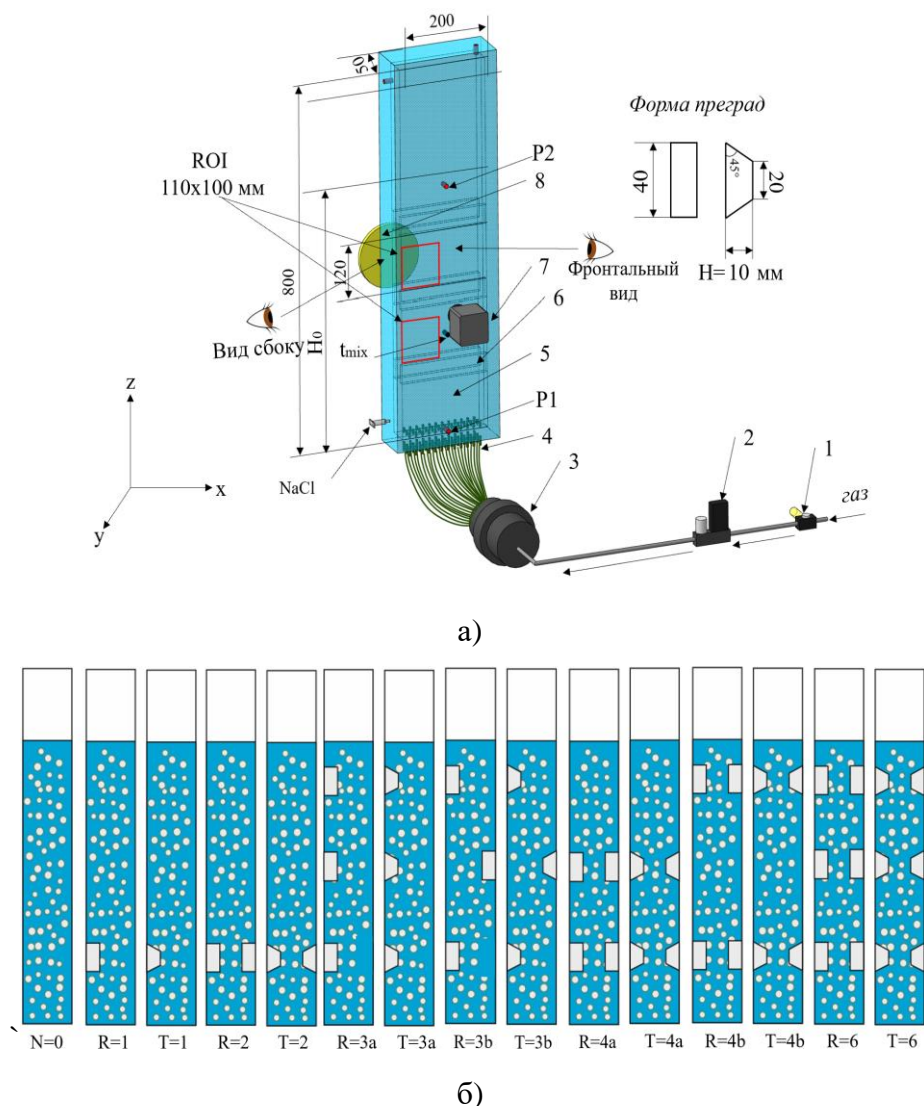


Рисунок 1 – Общий вид экспериментальной установки: а) пузырьковая колонна с преградами: 1 - детандер; 2-расходомер; 3- газовый смеситель; 4- газовые инжекторы; 5- пузырьковая колонна; 6-преграда-интенсификатор; 7-камера; 8-источник света; б) расположение преград в колонне

В разделе 3.2 подробно рассмотрено влияние введения преград-интенсификаторов на эволюцию газосодержания. Очевидно, что рост ϕ тесно связан с увеличением приведенной скорости газа U_G . Для классического барботажного реактора ($N=0$) в заданном диапазоне приведенных скоростей газа возможно идентифицировать два режима течения: монодисперсный (1) и переходный (2). Переход от одного режима к другому наблюдается при $U_{G\ 1-2}=0,051$ м/с. Тем не менее, перехода к полидисперсному режиму течения (3) не наблюдается в заданном диапазоне приведенных скоростей газа. Это можно объяснить «тонким» методом инъекции, что не способствует коалесценции и, следовательно, возникновению полидисперсного режима. При уменьшении количества капилляров с 36 до 18 и 12, соответственно, наблюдается наличие всех трех режимов течения, что можно объяснить изменением характера инъекции, при котором пузыри имеют большие размеры и активнее взаимодействуют между собой.

Установка одиночной преграды приводит к уменьшению поперечного сечения канала. Таким образом, при монодисперсном режиме течения в случае прямоугольной преграды ($R=1$, $CR=0,8$) часть пузырьков у стенки канала попадает под преграду и его всплытие задерживается. Пузырьки собираются в более крупный пузырь, пока он не отрывается и не всплывает. В случае преграды трапецевидного сечения этого явления не наблюдается, а пузыри проходят сразу в сужение. В то же время, вне зависимости от формы преграды, сразу за ней наблюдается зона свободной от пузырьков жидкости. Введение одиночной преграды не оказывает значительного влияния на смену режимов по сравнению с реактором без преград-интенсификаторов. Эволюция газосодержания, как функции приведенной скорости газа показана на рисунке 2а.

Введение парных преград приводит к более раннему режимному переходу, который наступает при $U_{G\ 1-2}=0,028$ м/с (см. рис. 2б). Существенное сужение канала способствует коалесценции пузырей при прохождении парных перегородок, что оказывает влияние на локальную гидродинамическую структуру потока. Это подтверждается более широким распределением пузырей по размерам. Последующее увеличение приведенной скорости приводит к возникновению развитого переходного режима (2'), что проявляется в формировании редких газовых снарядов. Увеличение количества парных преград и изменение их формы не оказывает влияния на параметры истинного газосодержания. Тем не менее, при наличии нескольких пар преград в колонне образуются «камеры». «Камеры» представляют собой пространство между двумя последовательными парами преград, в которых подъем пузырьков затрудняется прохождением сужения, что приводит к увеличению времени их пребывания в реакторе. Однако увеличение числа таких камер более одной не оказывает существенного влияния на газосодержание и смену режима

течения в колонне. Особое влияние на режимные переходы и образование камер оказывает выбор расстояния между парой преград. В работе рассматривались два расстояния между парами преград – 120 мм и 240 мм. Результаты представлены на рисунке 2в. Было выяснено, что близкое расположение преград способствует возникновению камеры и увеличивает коалесценцию пузырьков, что приводит к уменьшению газосодержания при высоких скоростях газа по сравнению с классической пузырьковой колонной. При расстоянии 240 мм «камера» не образуется, а структура течения близка к классическому барботажному реактору. Такие явления характерны для двух форм преград.

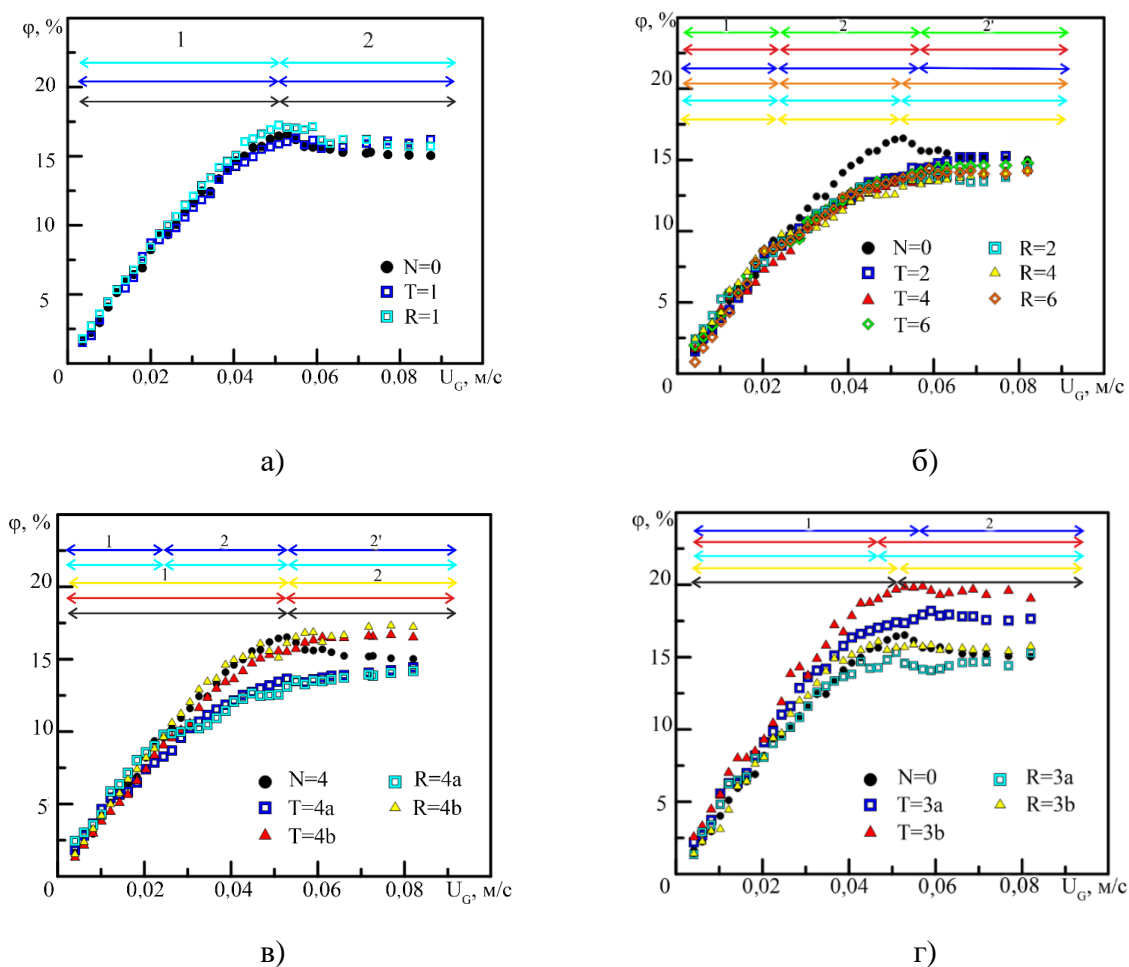


Рисунок 2 – Влияние внезапного и прогрессивного изменения сечения канала на истинное газосодержание в реакторе с:

- а) одиночной преградой; б) парными преградами; в) удаленными парными преградами; г) непарными преградами.

Рассмотрено размещение непарного количества на одну или по обе стенки канала (см. рис.2г). Было выяснено, что трапециевидные преграды ограничивают коалесценцию пузырей, а расположение преград по обе стенки канала позволяет избежать формирования

«камер». Таким образом, совместное влияние формы и расположения ($T=3b$) позволяет получить увеличение газосодержания на 33% по сравнению с реактором без преград в диапазоне приведенных скоростей газа до 0,08 м/с.

В разделе 3.3 рассматривалось влияние преград на время перемешивания в реакторе. Выяснено что введение преград увеличивает время перемешивания при скорости 0,004 м/с до двух раз по сравнению с реактором без преград (см. рис. 3). Тем не менее, при повышении приведенной скорости газа эффект влияния преград на время перемешивание снижается. Визуализация процесса перемешивания при помощи фенолфталеинового индикатора подтверждает наличие «камер» и затруднения перемещения пузырей между ними.

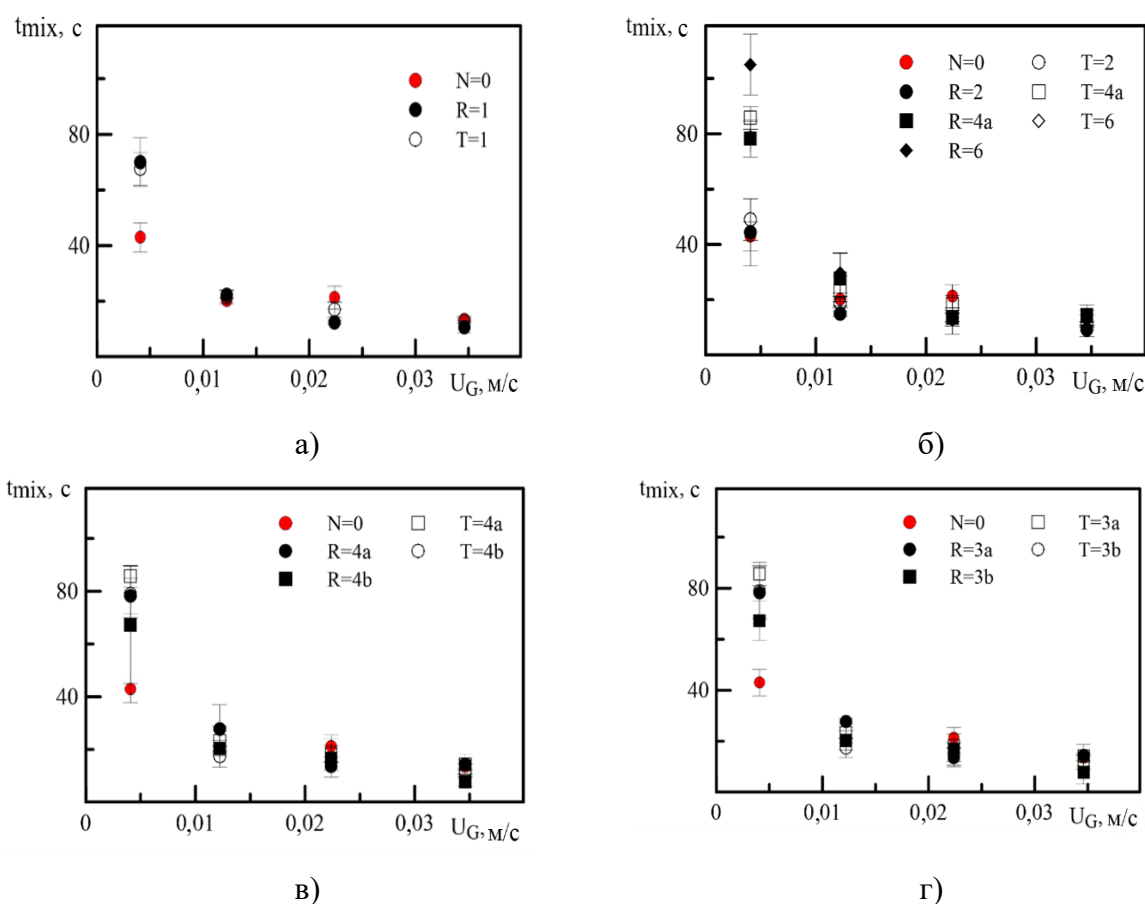


Рисунок 3 – Время перемешивания в реакторе с:

- а) одиночной преградой; б) парными преградами; в) удаленными парными преградами; г) непарными преградами.

Эффект ввода преград на объемный коэффициент массообмена k_{La} был рассмотрен в разделе 3.4. Показано, что с увеличением приведенной скорости газа наблюдается

увеличение объемного коэффициента массообмена. Введение канал преград приводит к интенсификации массообмена (см. рис. 4а).

Выяснено, что причиной увеличения k_{La} является рост межфазной поверхности, вызванный увеличением истинного газосодержания (см. рис. 4б). Показано, что качество барботажа также оказывает значительное влияние на объемный коэффициент массообмена. Величина k_{La} снижалась при уменьшении количества капилляров, что также объясняется генерацией меньшего количества пузырей и их большего размера, что уменьшило площадь межфазной поверхности.

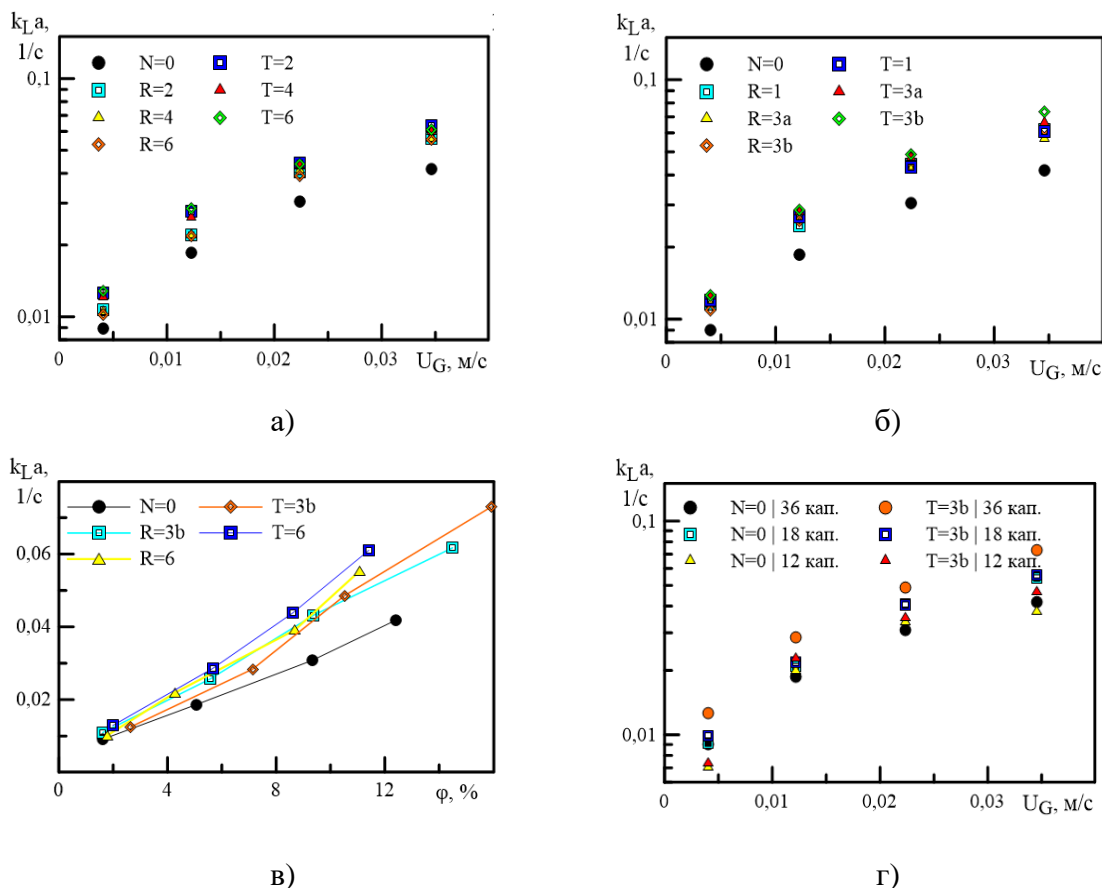


Рисунок 4 – Зависимость объемного коэффициента массообмена в реакторе:
 а) для парного расположения преград; б) для непарного расположения преград;
 в) в зависимости от истинного газосодержания; г) в зависимости от количества капилляров

Глава 4 посвящена исследованию локальной гидродинамической структуры восходящего отрывного пузырькового течения в вертикальном канале с преградами.

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 5 и подробно описана в разделе 4.1. Рабочая секция представляет собой оргстеклянный бокс с внутренними размерами 200x1000x16 мм. Создание отрывного потока осуществлялось при помощи

установки в канал преград с прямоугольным сечением, а также с сечением в виде равнобедренной и прямоугольной трапеции. Высота канала до преграды составляет $H_2=16$ мм, а высота преграды составляет $H=8$ мм, что соответствует степени расширения канала $ER=H_1/H_2=8/16=2$. Отношение длины преграды к её высоте $L/H=2,5$. Для сравнения влияния способа организации отрыва в канал устанавливалась пластина (уступ) размерами $200 \times 500 \times 8$ мм. Ввод газа осуществлялся через 9 капилляров с диаметром 0,3 мм размещенных по всей ширине канала, установленных в газовый смеситель, монтированный на высоте 150 мм от входа в канал. Число Рейнольдса Re_n для жидкой фазы, рассчитанное по высоте преграды составило от 0 до 15000. Расходное газосодержание варьируется от 0 до 5%. Средний размер пузырей при их генерации в эксперименте составлял 3 мм.

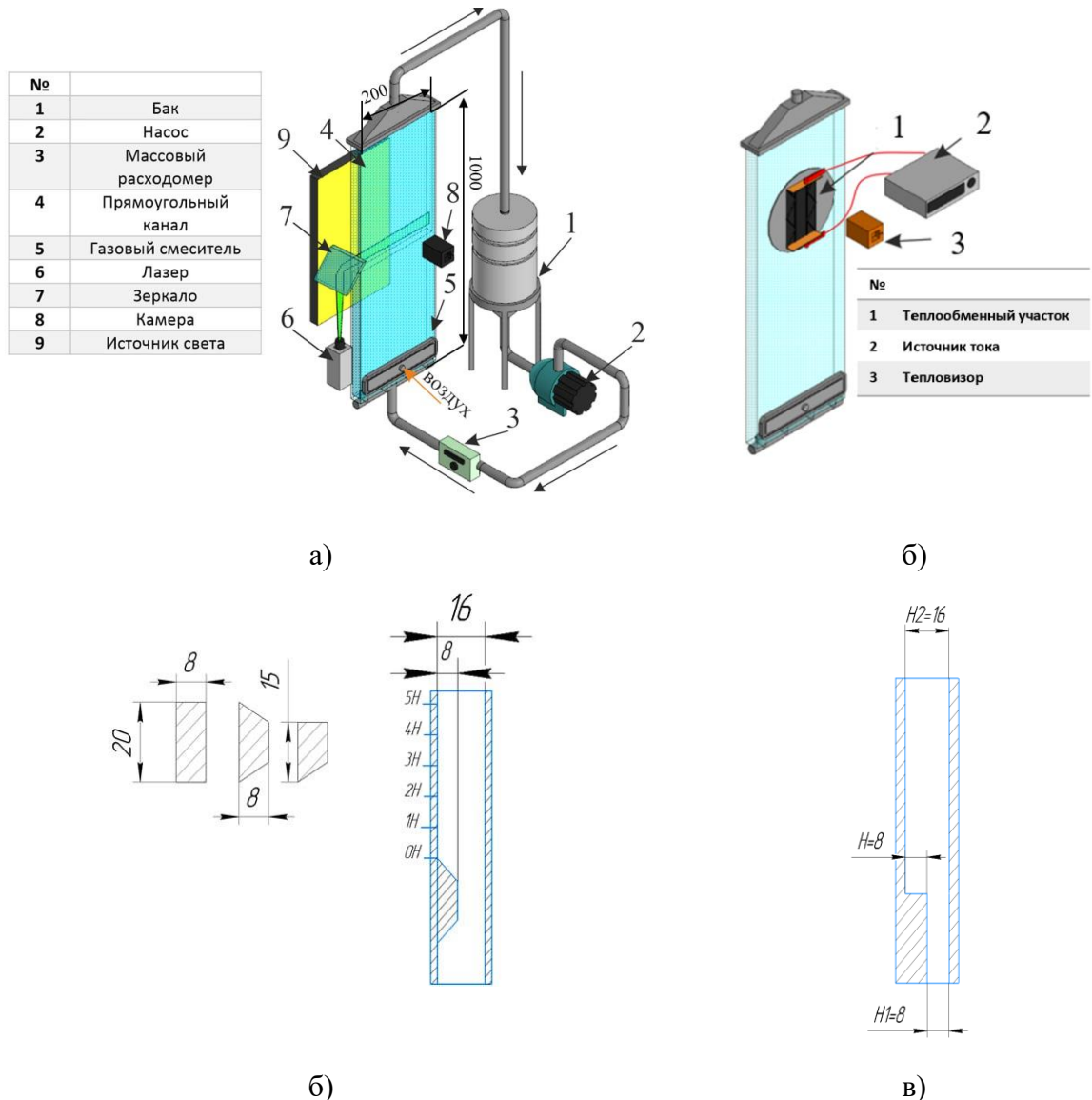


Рисунок 5 – Схема установки: а) с оптическим рабочим участком; б) с теплообменным рабочим участком; в) схема канала с одиночной преградой; г) схема с обратным уступом

Разделы 4.2 и 4.3 посвящены исследованию гидродинамической структуры потока. На рисунке 6 приведены профили скорости жидкости для однофазного и двухфазного потока за всеми типами преград при $Re_H=5000$. Для всех форм преград наблюдается явная асимметричность распределения скорости жидкости. Наиболее выраженная асимметрия наблюдается при введении преграды в форме равнобокой трапеции. Предполагается, что это связано с особенностями отрыва в виду формы преграды. Поток, отрывается только на передней кромке преграды, что и вызывает сильную асимметрию распределения скорости, по сравнению с прямоугольной преградой, которая в виду своей длины имеет дополнительную точку отрыва на самой преграде перед задней кромкой. Для всех типов преград характерно наличие отрицательных скоростей в области за преградой, что говорит о наличии рециркуляционной зоны. Постепенно, по мере удаления от уступа, асимметричность потока уменьшается за счет ослабления вихревых структур в зоне рециркуляции, но точка присоединения потоков находится вне зоны измерений (свыше $5H$).

При введении газа в поток асимметричный характер профилей скорости сохраняется, так же, как и структура течения за преградой. Тем не менее, восстановление потока в присутствии пузырей происходит быстрее. Очевидно, что на расстоянии $5H$ профили скорости уже близки к симметричному распределению.

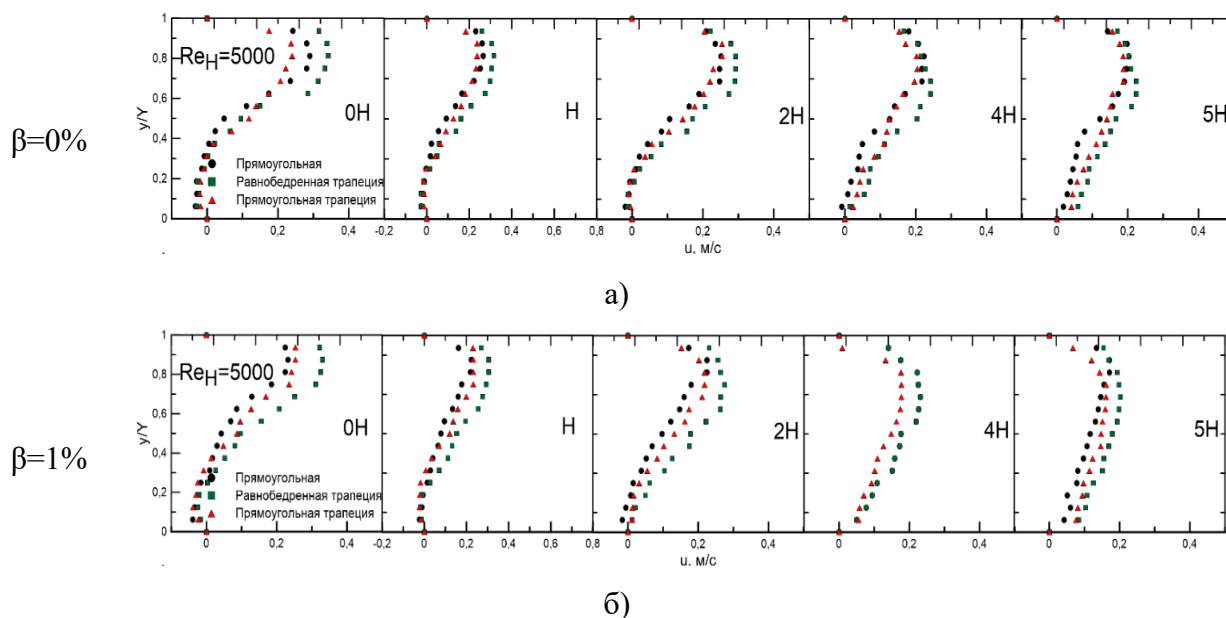


Рисунок 6 – Профили скорости жидкости в канале с преградами при $Re_H=5000$:

а) однофазного потока $\beta=0\%$; б) двухфазного потока $\beta=1\%$

В разделе 4.4 рассмотрена гидродинамическая структура течения в канале с обратным уступом. При введении в канал обратного уступа профили скорости жидкости имеют

схожую структуру, как в канале с преградами. На рисунке 7 показано сравнение визуализации течения в канале с прямоугольной преградой и обратным уступом.

При введении преград пузыри имеют тенденцию двигаться у стенки вдоль преграды, оставляя противоположную стенку свободной от газа. При наличии уступа при малом газосодержании пузыри движутся вдоль противоположных стенок, оставляя свободным центр канала. По мере удаления от уступа наблюдается выравнивание профиля газосодержания, что объясняется перераспределением пузырей по сечению канала.

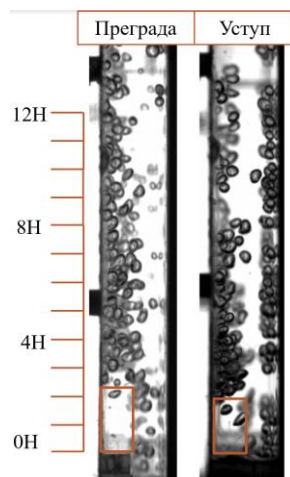


Рисунок 7 – Визуализация пузырькового течения в канале с преградой/обратным уступом при $Re_H=5000$

В главе 5 подробно исследован теплообмен восходящего отрывного пузырькового течения в вертикальном канале с преградами и обратным уступом. Для проведения экспериментов по измерению теплообмена был разработан рабочий участок (см. рис 5б), расположенный на высоте 730 мм от основания канала, который представляет собой фольгу из нержавеющей стали с размерами 70x145 мм с толщиной 0,2 мм, установленную заподлицо со стенкой канала. Подробное описание участка представлено в главе 2. Нагрев нержавеющей фольги осуществляется пропусканием через неё электрического тока от источника ($q_w=9,14 \text{ кВт/м}^2=const$). В качестве объекта измерения использовалась температура внешней стенки фольги. Съёмка проводилась тепловизором марки Fluke Ti32 и скоростным тепловизором марки FLIR x6550Sc.

Установка прямоугольной преграды в поток в целом приводит к улучшению теплообмена на стенке в области за преградой более, чем в два раза по сравнению с прямоугольным каналом без преград. Сразу за преградой наблюдается зона малоинтенсивного теплообмена длиной до $2H$, что выражается пониженными значениями числа Нуссельта. Ниже по потоку наблюдается рост числа Nu до максимального значения,

который предположительно приходится на зону присоединения потоков (4Н-5Н) для однофазного потока с последующей его уменьшением стабилизацией до постоянных значений в зоне релаксации потока. Выяснено, что введение газовых пузырей не оказывает влияния на характер теплоотдачи, а лишь оказывает влияние на её интенсивность и протяженность зон (см. рис. 8). Увеличение расходного газосодержания приводит к интенсификации теплообмена на величину до 2 раз, как в зоне максимума, так и в зоне релаксации по сравнению с однофазным потоком. Интенсификация теплообмена за преградой при вводе пузырей в поток наблюдается для всех форм преград. Наиболее интенсивная теплоотдача наблюдается для преграды в форме равнобедренной трапеции, предполагается, что этот эффект связан с особенностями отрыва перед преградой и на ней, что в свою очередь оказывает влияние на распределение газовых пузырей в канале и их смещение к стенке под преградой.

Увеличение числа Рейнольдса не оказывает значительного влияния на структуру распределения теплоотдачи на стенке, но изменяет длины ранее определенных зон. Стоит отметить, что с увеличением числа Рейнольдса интенсивность теплообмена снижается, но для всего диапазона параметров остается выше, чем для однофазного течения в канале без преград.

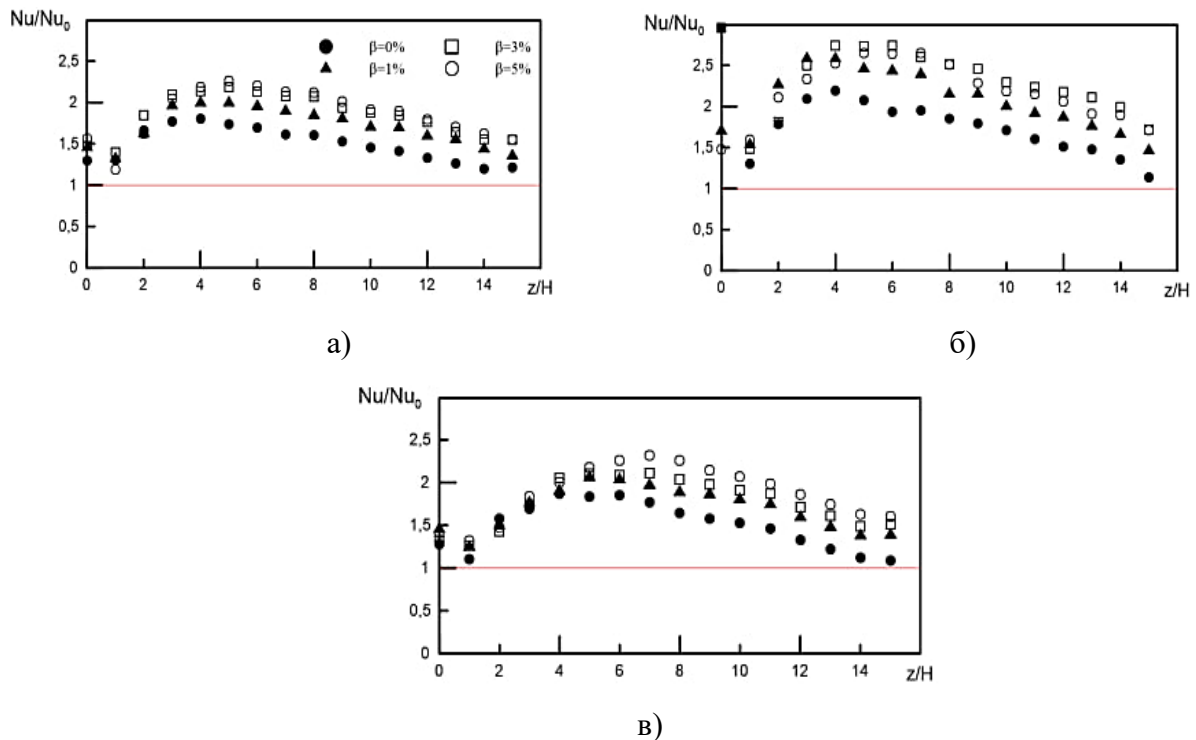


Рисунок 8 – Влияние расходного газосодержания на интенсивность теплоотдачи при $Re_H=5000$ за одиночной преградой в форме: а) прямоугольника; б) равнобедренной трапеции; в) прямоугольной трапеции

В разделе 5.3 рассмотрен теплообмен в канале с внезапным расширением. Характер теплоотдачи за уступом качественно схож с теплоотдачей за преградой. В используемом диапазоне газосодержаний для обратного уступа вся интенсификация теплообмена лежит в зоне релаксации. Интенсификации теплообмена при вводе газа в зоне присоединения на расстоянии 4-6H не наблюдается, как показано на рисунке 9а. Это различие можно объяснить особенностями отрыва течения при установке преграды и уступа. На рисунке 9б приведены осреднённые поля температуры для однофазного потока ($\beta=0\%$) и двухфазного потока ($\beta=5\%$) для прямоугольного обратного уступа. Стоит отметить, что в области присоединения разница между температурой стенки при одно- и двухфазном потоке имеет близкие значения, но при удалении от уступа, происходит уменьшение её в двухфазном потоке, что позволяет говорить об интенсификации теплоотдачи. При увеличении числа Рейнольдса для уступов двух форм происходит снижение интенсификации теплообмена по сравнению с каналом без уступа, но тем не менее, эффективность теплообмена в канале с уступом повышается в 2 раза в однофазном и на величину до 2,8 раз в двухфазном потоке.

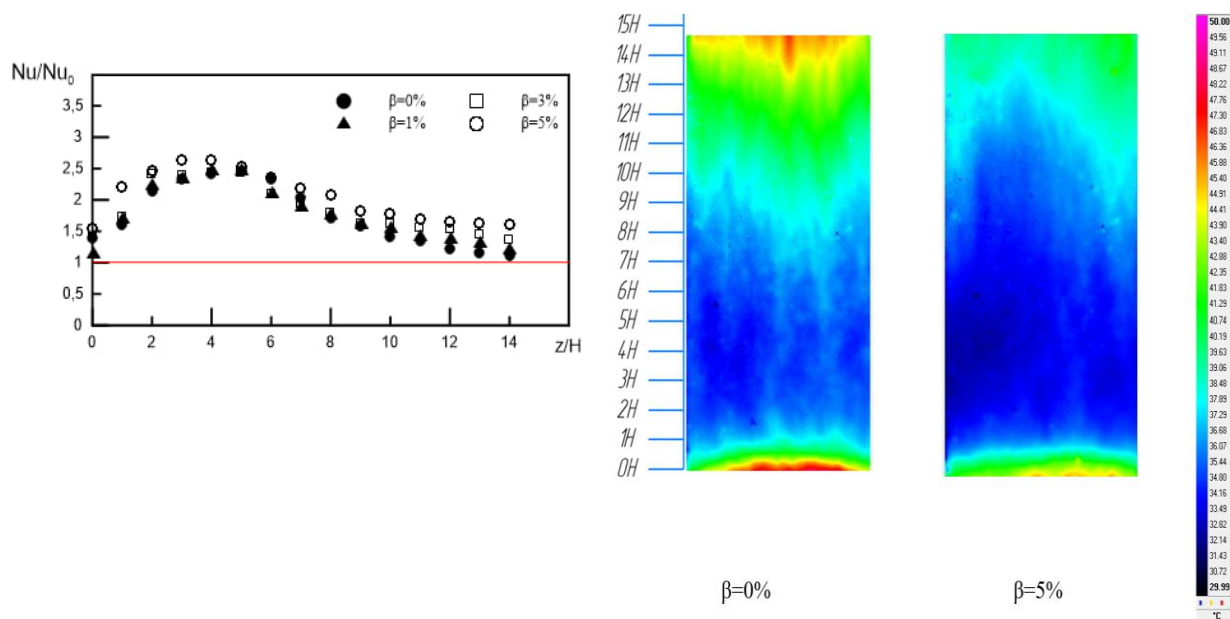


Рисунок 9 – Теплообмен в канале с обратным уступом при $Re_n=5000$: а) распределение числа Nu при $\beta=0\div 5\%$; б) осредненные поля температур

Было проведено исследования влияния угла наклона обратного уступа на теплоотдачу на стенке. Для однофазного потока было показано, что изменение угла наклона уступа практически не оказывает влияние на структуру распределения теплоотдачи [Terekhov et al., 2003]. Аналогичные результаты были обнаружены и для двухфазного течения.

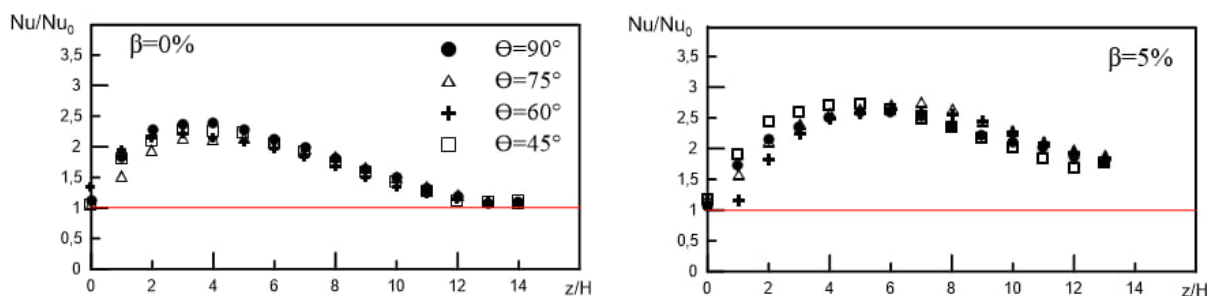


Рисунок 10 – Влияние угла наклона уступа на теплообмен при $Re_H=5000$

Основные выводы по диссертации

1. Выполнено комплексное экспериментальное исследование локальных и интегральных гидродинамических параметров двухфазных течений, тепло- и массообмена пузырьковых потоков с преградами-интенсификаторами различной конструкции;
2. Установлено, что введение преград и их взаимное расположение оказывает значительное влияние на структуру течения и смену режимов двухфазного потока, что позволяет управлять процессами массообмена в барботажном реакторе;
3. На основе анализа полученных экспериментальных данных о влиянии дисперсности газовой фазы и выполненных исследований, направленных на оптимизацию геометрических параметров барботажного реактора с преградами – интенсификаторами, достигнуто увеличение объемного коэффициента массообмена на величину до 60%. Установлено, что данный эффект связан со снижением скорости пузырей в отрывных областях течения, увеличением истинного газосодержания и площади межфазного взаимодействия;
4. Преграды-интенсификаторы являются эффективным средством улучшения теплоотдачи восходящих одно- и двухфазных потоков с увеличением коэффициента теплоотдачи в отрывной области течения до 2,8 раз в сравнении с однофазным потоком в плоском канале;
5. Двухфазное течение в канале с уступом или преградой приводит к уменьшению длины области возвратных течений на величину до двух высот преград/уступа и существенному изменению параметров теплоотдачи от нагреваемой стенки к потоку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hetsroni G. Handbook of Multiphase Systems. — New York : McGraw-Hill, 1981. — 1024 p.

2. Manjrekar O. N., Dudukovic M. P. Identification of flow regime in a bubble column reactor with a combination of optical probe data and machine learning technique // *Chemical Engineering Science*. — 2019. — Vol. 2. — P. 100023.
3. Ruzicka M. C., Drahoš J., Fialová M., Thomas N. H. Effect of bubble column dimensions on flow regime transition // *Chemical Engineering Science*. — 2001. — Vol. 56. — № 21. — P. 6117–6124.
4. Besagni G., Inzoli F., Ziegenhein T. Two-phase bubble columns: A comprehensive review // *ChemEngineering*. — 2018. — Vol. 2. — № 2. — P. 13.
5. Zhao L., Tang Z., Gu Y. [et al.] Investigate the cross-flow flat-plate photobioreactor for high-density culture of microalgae // *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. — 2018. — Vol. 13. — № 5. — P. e2247.
6. Guan X., Yang N. Characterizing regime transitions in a bubble column with internals // *AIChE Journal*. — 2021. — Vol. 67. — № 5. — P. e17167.
7. Aloui F., Souhar M. Experimental study of a two-phase bubbly flow in a flat duct symmetric sudden expansion — Part II: Liquid and bubble velocities, bubble sizes // *International Journal of Multiphase Flow*. — 1996. — Vol. 22. — № 5. — P. 849–861.
8. Pecherkin N., Chekhovich V. Mass Transfer in Two-Phase Gas-Liquid Flow in a Tube and in Channels of Complex Configuration // *Mass Transfer in Multiphase Systems and its Applications*. Ed. by Mohamed El-Amin. — Croatia: InTech, 2011. — Chapter 8. — P. 155–178.
9. Terekhov V. I., Yarygina N. I., Zhdanov R. F. Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2003. — Vol. 46. — № 23. — P. 4535–4551.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Перечень публикаций по теме диссертации в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. Патент № 2848923. Способ измерения скорости многофазного потока на основе корреляционного метода обработки изображений: № 2025111968 : опубл. 21.11.2025 / Чинак А.В., Евдокименко И.А., Лобанов П. Д., Прибатулин Н.А.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

2. **Evdokimenko I.A.**, Blel W., Gentric C., Vozhakov I.S., Alekseev M.V., Lukyanov A.A., Legrand J., Dechandol E., Thobie C., Si-Ahmed E.-K., Lobanov P.D. Experimental and numerical study of wall phenomena of confined bubble flow in a square channel // *Chemical Engineering Science*. — 2025. — Vol. 301. — P. 120681.
3. **Evdokimenko I.A.**, Lobanov P.D., Chinak A.V., Filippskii K.A., Si-Ahmed E.-K., Gentric C., Blel W., Legrand J. Investigation of the Hydrodynamic Structure of a Detached Two-Phase Bubble Flow and the Heat Exchange in a Rectangular Channel with an Obstacle // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. — 2025. — Vol. 98. — No. 1. — P. 173-182.
4. **Evdokimenko I.A.**, Lobanov P.D., Chinak A.V., Filippskii K.A., Si-Ahmed E.-K., Blel W., Gentric C., Legrand J. Error correction in correlative measurement methods // *Journal of Flow Visualization and Image Processing*. — 2025. — Vol. 32. — No. 4. — P. 51-61.
5. Bogatko T.V., Chinak A.V., **Evdokimenko I.A.**, Kulikov D.V., Lobanov P.D., Pakhomov M.A. The Effect of a Backward-Facing Step on Flow and Heat Transfer in a Polydispersed Upward Bubbly Duct Flow // *Water*. — 2021. — Vol. 13. — No. 17. — P. 2318.
6. **Evdokimenko I.A.**, Lobanov P.D., Pakhomov M.A., Terekhov V.I., Das P.K. The Effect of Gas Bubbles on the Flow Structure and Turbulence in a Downward Two-Phase Flow in a Vertical Pipe // *Journal of Engineering Thermophysics*. — 2020. — Vol. 29. — No. 3. — P. 414-423.
7. Chinak A.V., **Evdokimenko I.A.**, Kulikov D.V., Lobanov P.D. Experimental study of the local structure of a bubble flow in a flat channel with sudden expansion // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2021. — Vol. 2057. — No. 1. — P. 012040.
8. **Evdokimenko I.A.**, Kulikov D.V., Lobanov P.D., Pribaturin N.A. Liquid Velocity Distribution in a Flat Channel with Sudden Expansion // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2020. — Vol. 1677. — No. 1. — P. 012010.
9. Chinak A., **Evdokimenko I.**, Kulikov D., Lobanov P. Motion characteristics of bubbles behind a sudden channel expansion // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2019. — Vol. 1382. — P. 012089.