



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТ СО РАН, академик

  
Маркович Д.М.

« 10 » июля 2025 г.

М.П.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института теплофизики им С.С.Кутателадзе  
Сибирского Отделения Российской Академии наук

Диссертация на соискание степени кандидата технических наук «Экспериментальное исследование гидродинамических характеристик и тепломассообмена отрывных пузырьковых потоков» выполнена Евдокименко Ильей Анатольевичем в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

Соискатель Евдокименко Илья Анатольевич окончил в 2020 г. Магистратуру Новосибирского государственного технического университета по направлению «физика», специальности 16.04.01 Техническая физика. В период подготовки диссертации с 2020 года Работал в лаборатории проблем тепломассопереноса на должности инженера-исследователя, а с 2024 г. - в должности младшего научного сотрудника лаборатории физической гидродинамики. Соискатель проходил обучения в очной аспирантуре ИТ СО РАН с 2020 по 2024 год.

Диплом об окончании аспирантуры по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника выдан в 2024 г. Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель — доктор технических наук Лобанов Павел Дмитриевич работает ведущим научным сотрудником лаборатории физической гидродинамики ИТ СО РАН.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

### **Актуальность работы:**

Получение чистой энергии, снижение выбросов CO<sub>2</sub> 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 процессы переноса тепла и массы. Возможность управления интенсивностью процессов переноса 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 уменьшают турбулентность 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 тепломассопередачи.

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, ограниченных 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. Поэтому тема диссертационной работы является **актуальной**.

#### **Поставлены и решены следующие 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. Установлены закономерности влияния расположения преград и их формы на интенсификацию тепломассообменных процессов и изменение режимов двухфазного течения в реакторе.

Так, 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 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.

**Основные публикации автора по материалам диссертации в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных 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., Прибатурин 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 Ch., Si-Ahmed El-Khider , 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. Исследование гидродинамической структуры отрывного двухфазного пузырькового течения и теплообмена в прямоугольном канале с препятствием / **И. А. Евдокименко**, П. Д. Лобанов, А. В. Чинак, К. А. Филиппский, Э.-К. Си-Ахмед, С. Джентрик, В. Блель, Ж. Легран // *Инженерно-физический журнал*. – 2025. – Т. 98. – С. 173–182.
4. Error correction in correlative measurement methods / I. Evdokimenko, P. Lobanov, A. Chinak, K. Filippskii, E.-K. Si-Ahmed, W. Blel, C. Gentric, J. Legrand // *Journal of Flow Visualization and Image Processing*. – 2025. – Vol. 32. – P. 51-61
5. The Effect of a Backward-Facing Step on Flow and Heat Transfer in a Polydispersed Upward Bubbly Duct Flow / T. V. Bogatko, A. V. Chinak, **I. A. Evdokimenko**, D. V. Kulikov, P. D. Lobanov, M. A. Pakhomov // *Water*. – 2021. – Vol. 13 (17) – Art. 2318.
6. Влияние газовых пузырьков на структуру течения и турбулентность в нисходящем двухфазном потоке в вертикальной трубе / **И. А. Евдокименко**, П. Д. Лобанов, М. А. Пахомов, А. В. Чинак, Д. В. Куликов, В. В. Тарасенко // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2020. – Т. 29, № 3. – С. 414–423.
7. Experimental study of the local structure of a bubble flow in a flat channel with sudden expansion / A. V. Chinak, **I. A. Evdokimenko**, D. V. Kulikov, P. D. Lobanov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2057. – Art. 012040.
8. Liquid Velocity Distribution in a Flat Channel with Sudden Expansion / **I. A. Evdokimenko**, D. V. Kulikov, P. D. Lobanov, N. A. Pribaturin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1677. – Art. 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.

#### **Апробация работы:**

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 Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева "Проблемы газодинамики и тепломассообмена 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.

**Решение о рекомендации к защите:**

Диссертация Евдокименко Ильи Анатольевича «Экспериментальное исследование гидродинамических характеристик и тепломассообмена отрывных пузырьковых потоков» соответствует критериям, установленным в соответствии с Федеральным законом о науке и государственной научно-технической политике и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» .

Заключение принято на заседании семинара секции №5 «Теплофизические основы энергетики (включая горение)» под руководством академика РАН Алексеенко С.В. от 10 июля 2025 г.

Присутствовало на заседании 16 человек, в том числе 1 академик РАН, 3 чл.-корр. РАН, 9 докторов наук, 3 кандидата наук.

Результаты голосования от 10.07.2025: «за» – 16 человек, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек.



« 10 » июля 2025 г.

Председатель семинара  
Алексеенко Сергей Владимирович  
академик РАН,  
научный руководитель ИТ СО РАН



« 10 » июля 2025 г.

Секретарь Секции Ученого совета  
Лукашов Владимир Владимирович  
К.т.н., в.н.с. лаборатории физических основ  
энергетических технологий