



УТВЕРЖДАЮ

И.о. ректора Национального исследовательского
Томского политехнического университета
доктор физико-математических наук

Л.Г. Сухих

2026 г.

10 » 04

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на диссертационную работу
Евдокименко Ильи Анатольевича
«Экспериментальное исследование гидродинамических характеристик и теплообмена отрывных пузырьковых потоков», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность исследований. Объект и предмет исследований. Течения двухфазных («вода – пар» или газожидкостных) сред реализуются во многих технологических процессах различных отраслей промышленности при работе дымоуловителей, пенных тарельчатых абсорберов, золоуловителей, газопромывателей, дегазаторов, дымоочистителей, ректоров и других вариантов аппаратов. Но все реальные аппараты, по рабочим трактам которых перемещаются двухфазные или газожидкостные среды, разработаны по результатам, в основном, прикладных экспериментальных исследований на прототипах будущих изделий. До последнего времени отсутствует общая теория процессов движения пузырьковых сред, обеспечивающая адекватное прогнозирование характеристик таких процессов. Во многом это обусловлено малым объемом экспериментальных данных, иллюстрирующих основные закономерности движения двухфазных или газожидкостных потоков. Недостаточно изучены до настоящего времени гидродинамические и теплообменные процессы в условиях отрывных пузырьковых течений. Поэтому тема диссертации И.А. Евдокименко, целью которой является «оптимизация методов управления процессами тепло- и массообмена в пузырьковых реакторах с помощью легко обслуживаемых интенсификаторов без механических элементов и внешнего подвода энергии, является, безусловно, актуальной.

Оценивая актуальность темы диссертации И.А. Евдокименко следует отметить, что по своим цели, задачам, содержанию и достигнутым результатам она соответствует приоритетному направлению развития науки,

результатам она соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика».

Структура, объем диссертации и ее основные разделы

Диссертационная работа И.А. Евдокименко состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы. Рукопись содержит 110 страниц текста, 54 рисунка, 3 таблицы, 1 приложение. Список литературы включает 164 наименования.

Во введении автор обосновал актуальность темы своей диссертации, сформулировал цель и задачи диссертационного исследования, основные защищаемые положения, научную новизну и практическую значимость диссертации.

В первой главе выполнен анализ современного состояния исследований двухфазных и газожидкостных пузырьковых течений. Выделены основные режимы таких потоков. Показано, что одним из способов управления интенсивностью процессов тепло- и массопереноса в таких средах является изменение гидродинамической структуры потока путем использования пассивных завихрителей (преграды, ребра, уступы, стержни, дуги). Приведены сведения об исследованиях отрывных течений в вертикальных каналах пузырьковых потоков и однофазных. Ранее установлено, что введение пузырей в поток позволяет интенсифицировать теплоперенос в три раза по сравнению с однофазным потоком.

Во второй главе приведено описание методик выполненных автором экспериментов и экспериментальных установок. Также приведены неопределенности полученных в экспериментах результатов.

Третья глава посвящена описанию результатов исследований влияния преград – интенсификаторов на смену режимов, время перемешивания и массообмен в пузырьковой колонне. Также приведены сведения об использовавшемся в этих исследованиях экспериментальном стенде. Установлено, что совместное влияние формы и расположения установленных преград приводит к существенному увеличению (до 33 %) газосодержания по сравнению с реактором без преград в диапазоне приведенных скоростей газа до 0,08 м/с. Также изучено влияние преград на время перемешивания в реакторе и на объемный коэффициент массообмена. Последнее обусловлено ростом межфазной поверхности, который вызван увеличением газосодержания.

В четвертой главе приведены результаты исследований локальной гидродинамической структуры восходящего отрывного пузырькового течения в вертикальном канале с преградами. Приведена и схема экспериментальной установки, с использованием которой были получены приведенные в четвертой главе результаты. Зарегистрирована в проведенных автором экспериментах явная асимметричность распределений скоростей жидкости

для всех рассматривавшихся форм преград. Сформулирована гипотеза, объясняющая механизм установленных закономерностей. Также установлено, что при введении газа в поток асимметричный характер профилей скорости сохраняется, также как и структура течений за преградой. Восстановление же потока в присутствии пузырей происходит быстрее. Исследованы и гидродинамические структуры течения в каналах с обратным уступом. В этом случае профили скорости жидкости имеют схожую структуру, как в канале с преградами. Показано, что при введении преград пузыри в основном движутся у стенки вдоль преграды, оставляя противоположную стенку свободной от газа. По мере удаления от уступа имеет место выравнивание профиля газосодержания, что обусловлено перераспределением пузырей по сечению канала.

Пятая глава включает результаты исследований теплообмена восходящего отрывного пузырькового течения в вертикальном канале с преградами и обратным уступом. Использован специальный рабочий участок – фольга из нержавеющей стали, установленная заподлицо со стенкой канала. Регистрировалась температура внешней поверхности фольги с использованием двух тепловизоров (в том числе и скоростного). Установлено, что прямоугольная преграда в потоке в целом приводит к интенсификации теплообмена на стенке в области за преградой более чем в два раза по сравнению с прямоугольным каналом без преград. Также установлено, что введение пузырей газа влияет на интенсивность теплоотдачи и протяженность характерных зон (непосредственно за преградой и зона присоединения потока для однофазного течения). Увеличение газосодержания приводит также к интенсификации теплообмена, как в зоне максимальной теплоотдачи, так и в зоне релаксации по сравнению с однофазным потоком. Интенсификация теплообмена за преградой при вводе пузырей в поток имеет место для всех форм преград. Эксперименты показали, что увеличение числа Рейнольдса не оказывает значительного влияния на структуру распределения теплоотдачи на стенке, но изменяет протяженность характерных зон. При этом рост числа Re приводит к снижению интенсивности теплообмена, но для всего диапазона параметров остается выше, чем для однофазного течения в канале без преград. Исследован также теплообмен в канале с внезапным расширением.

Итоги выполненного И.А. Евдокименко диссертационного исследования подведены в разделе «Основные выводы по диссертации».

Общая методология и методика исследования

Применяемые в диссертации И.А. Евдокименко методики исследования включают в себя совокупность теоретических и экспериментальных подходов к изучению гидромеханических и тепломассообменных процессов при отрывных течениях пузырьковых двухфазных и газожидкостных сред. Автор модернизировал известные методы, стенды и установки применительно к решению задач своего диссертационного исследования. При разработке

методик измерения характеристик гидродинамических и тепломассообменных процессов в пузырьковых средах и в условиях отрывных течений автор диссертации использовал современные представления об отрывных и пузырьковых течениях (модели, результаты теоретических исследований, математический аппарат теории отрывных и пузырьковых течений). При планировании, организации, проведении экспериментальных исследований и обработке результатов большое внимание автор уделял анализу неопределенностей (погрешностей по старой терминологии) результатов измерений. После анализа и обобщения установленных при проведении своих экспериментальных исследований (которые можно обоснованно квалифицировать как фундаментальные) основных закономерностей исследовавшихся в диссертации процессов И.А. Евдокименко сформулировал группу гипотез о механизмах переноса массы, импульса и энергии в пузырьковых отрывных потоках. При этом все выводы автора диссертации соответствуют современным представлениям о физике процессов переноса в условиях отрывных пузырьковых течений.

Степень обоснованности и достоверности результатов научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность полученных автором диссертации результатов и, соответственно, основных защищаемых положений и выводов определяется, в первую очередь, логической связанностью всех этапов диссертационного исследования И.А. Евдокименко. Автором выполнен большой объем сложных по подготовке, проведению и обработке результатов фундаментальных экспериментальных исследований гидродинамических и тепломассообменных процессов в пузырьковых отрывных потоках. Для регистрации основных характеристик исследовавшихся сложных физических процессов использовались как хорошо апробированные методики и алгоритмы, так и разработанные автором диссертации. Эксперименты в идентичных условиях проводились несколько раз для обеспечения возможности объективного анализа рассеяния экспериментальных данных (неопределенностей). Все основные выводы сформулированы автором на основании детального анализа и последующего обобщения результатов выполненных автором диссертации экспериментов. Полученные И.А. Евдокименко результаты диссертационного исследования многократно апробировались на авторитетных международных и всероссийских конференциях, что также является достаточно убедительным доказательством обоснованности основных результатов и выводов, проведенных в диссертации И.А. Евдокименко.

Научная новизна полученных результатов, выводов и защищаемых положений.

И.А. Евдокименко получил большую группу результатов экспериментальных исследований, соответствующих современному критерию новизны. Новизна результатов диссертационного исследования И.А.

Евдокименко подтверждается публикациями статей в ведущих международных журналах и журналах РАН, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций. Наиболее значимыми научными результатами являются следующие.

1. Установлено, что введение преград в поток и их взаимное расположение оказывают существенное влияние на структуру течения и смену режимов двухфазных и газожидкостных потоков, что создает объективные предпосылки для управления процессами массообмена в барботажном реакторе.

2. Показано, что может быть достигнуто увеличение объемного коэффициента массообмена до 60% при установке в барботажных реакторах преград – интенсификаторов.

3. Установлено, что преграды – интенсификаторы являются эффективным средством повышения интенсивности теплоотдачи восходящих однофазных и двухфазных потоков с увеличением коэффициента теплоотдачи в отрывной области течения до 2,8 раз в сравнении с однофазным потоком в плоском канале.

4. По результатам выполненных экспериментов установлено, что двухфазное течение в канале с уступом или преградой приводит к уменьшению протяженности области возвратных течений на величину до двух высот преград (уступа) и значительному изменению параметров теплоотдачи от нагреваемой стенки.

Практическая значимость полученных результатов.

Диссертационное исследование И.А. Евдокименко при всей фундаментальности имеет практическое значение. Результаты, полученные автором, могут быть использованы при проведении опытно-конструкторских работ по созданию разного рода барботажных реакторов, а также узлов и блоков энергетического оборудования.

Замечания по диссертационной работе.

1. На рисунке 25 по оценке влияния количества инжекторов на истинное газосодержание в реакторе с преградами графики (а) и (б), вероятно, перепутаны местами, так как при инъекции через 12 капилляров наблюдается меньшее количество пузырей большего диаметра, нежели чем при введении газа через 18 капилляров.

2. В главе 3 приводятся экспериментальные результаты по определению режимов течения, и в параграфе 3.2.4. диссертант упоминает «развитый» переходный режим (2-2'), описание которого в тексте диссертации не приводится.

3. На рисунках 36 и 39 представлены поля скоростей, при этом в тексте отмечается, что «формируются зоны отрицательных скоростей, соответствующие синему цвету на картах скоростей», а также упоминается

наличие рециркуляционных областей (возвратного течения). Вместе с тем для более наглядного и обоснованного анализа структуры потока диссертанту следовало бы дополнительно представить векторное поле скоростей.

4. Приводя визуализацию течения газовых пузырей за преградой, диссертант указывает на наличие «зоны замедления пузырей» за преградой. Тем не менее, никакой количественного подтверждения этой оценки скорости пузырей не приводится.

5. Текст диссертации содержит опечатки и грамматические ошибки.

Однако число и содержание данных замечаний не критичны для восприятия и анализа работы, для высокой оценки научной и практической значимости полученных диссертантом результатов.

Заключение по диссертации.

Материал диссертации И.А. Евдокименко изложен последовательно и развернуто доступным и ясным для понимания языком без существенных замечаний по стилю и форме изложения, хорошо иллюстрирован качественно оформленными рисунками, фотографиями, приложенными таблицами.

Содержание автореферата и сформулированные в нем выводы полностью соответствуют представленным в диссертации результатам исследований. Публикации также отражают основные положения диссертации.

Диссертация И.А. Евдокименко «Экспериментальное исследование гидродинамических характеристик и тепломассообмена отрывных пузырьковых потоков» выполнена на высоком научном уровне, изложена научным языком.

Анализ работы позволяет сделать обоснованный вывод о том, что по актуальности темы, достоверности, оригинальности полученных результатов и сформулированных выводов диссертационная работа «Экспериментальное исследование гидродинамических характеристик и тепломассообмена отрывных пузырьковых потоков» полностью соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Илья Анатольевич Евдокименко заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.14. – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук, профессором НОЦ И.Н. Бутакова Стрижаком Павлом Александровичем и доктором физико-математических наук, профессором НОЦ И.Н. Бутакова Кузнецовым Гением Владимировичем.

Доклад И.А. Евдокименко и отзыв по диссертации заслушаны, обсуждены и утверждены на семинаре НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики 09 апреля 2026 г.

Председатель семинара НОЦ И.Н. Бутакова
Инженерной школы энергетики НИ ТПУ,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор НОЦ И.Н. Бутакова
Кузнецов Гений Владимирович



Доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент РАН,
профессор НОЦ И.Н. Бутакова,
заведующий лабораторией тепломассопереноса ТПУ
Стрижак Павел Александрович



Секретарь семинара НОЦ И.Н. Бутакова
Инженерной школы энергетики НИ ТПУ
Кандидат технических наук
Солодовникова Жанна Андреевна



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет» ФГАОУ ВО НИ ТПУ, ТПУ
почтовый адрес: 634050, Томская область, г. Томск, проспект Ленина, д. 30,
Телефон: +7 (3822) 60-63-33
pavelspa@tpu.ru
<https://tpu.ru>

Даем согласие на включение своих персональных данных в документы,
связанные с защитой диссертации Евдокименко Илья Анатольевича, и их
дальнейшую обработку.