

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева,
д. х. н., профессор В. В. Румянцев

« 27 »

г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация на тему: «Совмещение методов физического и математического моделирования при определении основных гидродинамических параметров работы противоточных тарелок» по научной специальности 2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки) выполнена на кафедре процессов и аппаратов химической технологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

В процессе подготовки диссертации Яшин Виктор Евгеньевич, «30» июня 1981 года рождения, работал на кафедре процессов и аппаратов химической технологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» в должности ассистента.

Диплом об окончании аспирантуры выдан в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет» в 2022 году.

Научный руководитель – доктор технических наук по специальностям 05.17.08 – Процессы и аппараты химической технологии и 05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов, доцент, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химической технологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» Равичев Леонид Владимирович.

По результатам рассмотрения диссертации на тему: «Совмещение методов физического и математического моделирования при определении основных гидродинамических параметров работы противоточных тарелок» принято следующее заключение.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена широким распространением тарельчатых аппаратов. Их работа сопровождается образованием динамической пены при взаимодействии газа и жидкости на тарелке. Исследования гидродинамики, массообмена и теплообмена на пенных тарелках и, в целом, процессов дистилляции и абсорбции, где используются эти контактные устройства, продолжаются более ста лет и не показывают тенденции к снижению интенсивности. Продолжают разрабатываться и испытываться новые конструкции пенных тарелок как универсальных, так и оптимизированных для узкой области применения в конкретном процессе.

В процессах очистки газов от пыли противоточные провальные тарелки имеют преимущества по сравнению с перекрёстноточными с переливными устройствами из-за меньшей склонности к загрязнению отверстий и более простой конструкции аппарата. Мокрый способ пылеулавливания удобен в производствах гранулированных солей, т.к. получаемый солевой раствор возвращается в рецикл. Именно в таких процессах пенные аппараты с противоточными тарелками получили широкое распространение.

Процессы взаимодействия сред в пенном режиме весьма сложны, поэтому многие параметры, необходимые для расчета, могут быть описаны только эмпирическими уравнениями. Для противоточных пенных тарелок, где, в отличие от перекрёстноточных, высота пенного слоя не регулируется высотой перелива, особенно сложным является определение высоты слоя чистой жидкости на тарелке. Практически для каждой новой конструкции тарелки необходимо проводить экспериментальное определение допустимого диапазона работы по скоростям газа, плотностям орошения жидкости и соответствующей высоте пенного слоя.

Для сокращения затрат на физическое моделирование все большее распространение получают исследования пенного режима методами вычислительной гидродинамики (computational fluid dynamics, CFD-моделирование), однако, к настоящему моменту они не достаточно широко применялись для противоточных тарелок.

Для исследований выбраны используемые в производствах минеральных удобрений и гранулированных солей противоточные пенные тарелки с крупными круглыми отверстиями, применяемые для очистки газа от пыли, склонной к налипанию, а также получившие распространение в недавнее время тарелки с фиксированными клапанами, которые до сих пор практически не исследовались при использовании в качестве противоточных.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Впервые проведено физическое моделирование работы противоточных тарелок с фиксированными клапанами и определены гидродинамические параметры режимов их работы.

2. Выполнено CFD-моделирование методом объемной доли жидкости (volume of fluid, VOF), с использованием программного пакета OpenFOAM для пенного слоя на противоточных тарелках.

3. Выполнено CFD-моделирование методом взаимопроникающих сред (модель «Эйлера-Эйлера») с использованием программного пакета ANSYS для пенного слоя на противоточных тарелках. Методика расчета коэффициента лобового сопротивления C_D адаптирована для моделирования противоточной пенной тарелки.

4. Разработана методика расчета эффективности очистки газа в аппарате с противоточными пенными тарелками и проволочным (сетчатым) туманоуловителем, учитывающая дисперсионный состав частиц капельного уноса.

Теоретическая и практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Проведены экспериментальные исследования противоточных тарелок с фиксированными клапанами, определен рекомендуемый диапазон нагрузок по газу и жидкости. Показаны преимущества данных тарелок по сравнению с известными типами противоточных тарелок.

2. Проведено моделирование гидродинамики противоточной пенной тарелки с использованием известных методик CFD-моделирования в различных программах, определены границы применимости известных методик.

3. Предложена методика CFD-моделирования противоточной пенной тарелки с использованием модели взаимопроникающих сред с определением коэффициента сопротивления пузыря CD .

4. Предложена методика проектного расчета пенного аппарата с учетом влияния дисперсионного состава брызгоуноса на эффективность туманоуловителя и остаточное содержание загрязняющих веществ в выбросах.

5. Результаты работы могут быть использованы проектными организациями при проектировании и расчёте пенных аппаратов мокрой очистки газа.

Работа характеризуется логичностью построения, аргументированностью основных научных положений и выводов, а также четкостью изложения.

Основные положения диссертации получили полное отражение в 4 статьях, из них 3 – в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Chemical Abstracts.

Результаты диссертации представлены на международных и всероссийских конференциях, в том числе на: Всероссийских и Международных конференциях: Международный научно-технический симпозиум «Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности», посвященный 110-летию А.Н. Плановского (ISTS «EESTE-2021»), Российский Государственный Университет имени А.Н. Косыгина, Россия, 20-21 октября 2021 г., II Международной Российско-Азербайджанской научной конференции, посвященной 880-летию Великого Азербайджанского поэта-просветителя Низами Генджеви (Уфа, 17-19 ноября 2021 г.). -Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2021 г., VII Всероссийской студенческой научно-технической конференции «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология». 28 – 30 мая 2024 г. Казань. Казанский национальный исследовательский технологический университет, XIV международной научно-практической конференции «Актуальные исследования и инновации в науке и технике». 18 апреля 2024 г. Москва. МНИЦ «Твоя наука».

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных:

1. Яшин В.Е. Моделирование пенного слоя на противоточной тарелке методом вычислительной гидродинамики / В.Е. Яшин, Л.В. Равичев, А.М. Трушин // Химическая промышленность сегодня. – 2023. – № 3. – С. 38-45. **(Chemical Abstracts)**

2. Яшин В.Е. Применение противоточных пенных тарелок с фиксированными клапанами в пенных абсорберах / В.Е. Яшин, Л.В. Равичев, А.М. Трушин, Д.Р. Сахапов // Химическая промышленность сегодня. – 2022. – № 3. – С. 28-35. **(Chemical Abstracts)**

3. Trushin A.M. On Calculating the Rate of Onset of Fluidization / A.M. Trushin, M.A. Nosyrev, L.V. Ravichev, V.E. Yashin // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 55, No. 2. – P. 325-327. – DOI 10.1134/S0040579521020123. **(Scopus)**.

Публикации в рецензируемых изданиях:

4. Яшин В. Е. Влияние брызгоуноса на остаточное загрязнение газа после пенного абсорбера с проволочным туманоуловителем / В.Е. Яшин, Л.В. Равичев, А.М. Трушин // Промышленные процессы и технологии. – 2024. – Т. 4, № 1. – С. 67-76. – DOI:10.37816/2713-0789-2024-4-1(11)-67-76

Публичные доклады на международных научных мероприятиях (конференциях, съездах, симпозиумах, конгрессах):

5. Равичев Л.В. Моделирование средствами вычислительной гидродинамики (CFD) пенного режима на противоточной тарелке / Л.В. Равичев, А.М. Трушин, **В.Е. Яшин** // Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ISTS “EESTE-2021”): Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума, посвященного 110-летию А.Н. Плановского, в рамках Третьего Международного Косыгинского форума «Современные задачи инженерных наук», Москва, 20 – 21 октября 2021 года. Том 1. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», 2021. – С. 204-210.

6. Равичев Л.В. Тенденции исследований пенных аппаратов и пенного режима / Л.В. Равичев, А.М. Трушин, **В.Е. Яшин** // Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ISTS “EESTE-2021”): Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума, посвященного 110-летию А.Н. Плановского, в рамках Третьего Международного Косыгинского форума «Современные задачи инженерных наук», Москва, 20 – 21 октября 2021 года. Том 1. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», 2021. – С. 412-423.

7. Яшин В.Е. Использование методов вычислительной гидродинамики для моделирования пенного режима на противоточной тарелке / В.Е. Яшин, Л.В. Равичев, А.М. Трушин // Перспективы инновационного развития химической технологии и инженерии: II Международная научная конференция, Сумгаит, 18 – 19 ноября 2021 года. Том 7. – SUMQAYIT: Сумгаитский государственный университет, 2021. – С. 37.

8. Аганичева И.В. Эффективность улавливая брызгоуноса проволоочным туманоуловителем / И.В. Аганичева, **В.Е. Яшин** // Интенсификация теплообменных процессов, промышленная безопасность и экология: Материалы VII Всероссийской студенческой научно-практической конференции, Казань, 28 – 30 мая 2024 года. – Казань: ООО «Конверс», 2024. – С. 33-38.

9. Яшин В.Е. Гидродинамика противоточных пенных тарелок / **В.Е. Яшин**, Л.В. Равичев // Актуальные исследования и инновации в науке и технике: сборник статей XIII Международной научно-практической конференции, Москва, 18

апреля 2024 года. – Москва: Международный научно-издательский центр «Твоя наука», 2024. – С. 184-192.

По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий в части:

п. 2. Теория подобия, моделирование и масштабирование химико-технологических процессов и аппаратов, машин и агрегатов;

п. 3. Способы, приемы, методология исследования гидродинамики движения жидкости, газов, перемещение сыпучих материалов в технологических аппаратах и схемах;

п. 7. Способы, приемы, методология изучения нестационарных режимов протекания процессов в химической аппаратуре, в том числе с целью формирования предпосылок эффективного управления и автоматизации;

п. 10. Методы изучения, совершенствования и создания ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности, обеспечивающие минимизацию отходов, газовых выбросов и сточных вод, в том числе разработка химико-технологических процессов переработки отходов.

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертация Яшина Виктора Евгеньевича является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей результаты, полученные на основании исследований, проведенных на высоком научном и техническом уровне с применением современных методов исследования. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные автором, теоретически обоснованы и не вызывают сомнений. Представленные в работе результаты принадлежат Яшину Виктору Евгеньевичу; они оригинальны, достоверны и отличаются научной новизной и практической значимостью.

С учетом научной зрелости автора, актуальности, научной новизны и практической значимости работы, а также ее соответствия требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», предъявляемым к подобным работам, диссертация на тему: «Совмещение методов физического и математического моделирования при определении основных гидродинамических параметров работы противоточных тарелок» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация рассмотрена на заседании кафедры процессов и аппаратов химической технологии, состоявшемся «18» июня 2025 года, протокол № 12.

В обсуждении приняли участие: к.т.н., профессор Моргунова Е.П.; доцент кафедры, к.т.н., доцент Кузнецова Т.И.; доцент кафедры, к.т.н., доцент Носырев М.А.; доцент кафедры, к.т.н., доцент Ильина С.И.; доцент кафедры, к.т.н., доцент Трушин А.М.; заведующий кафедрой кибернетики химико-технологических процессов, д.т.н., профессор Глебов М.Б.

Принимало участие в голосовании 14 человек. Результаты голосования: «За» – 14 человек, «Против» – 0 человек, воздержались – 0 человек, протокол № 12 от «18» июня 2025 г.

Председатель заседания
Профессор кафедры
процессов и аппаратов
химической технологии
д.т.н., профессор

Г.В. Терпугов

Секретарь заседания
Доцент кафедры
процессов и аппаратов
химической технологии
к.т.н., доцент

С.И. Ильина