



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»

На правах рукописи

Яшин Виктор Евгеньевич

**СОВМЕЩЕНИЕ МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОСНОВНЫХ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ПРОТИВОТОЧНЫХ
ТАРЕЛОК**

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре Процессов и аппаратов химической технологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент Равичев Леонид Владимирович, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химической технологии Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
доцент Чуракова
Светлана
Константиновка

кандидат химических
наук, профессор
Беренгартен Михаил
Георгиевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», профессор базовой кафедры «Моделирование и проектирование процессов и аппаратов химических технологий»,

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», профессор кафедры «Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств»,

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Защита диссертации состоится «25» декабря 2025 года в 11:00 на заседании диссертационного совета РХТУ.2.6.09 при ФГБУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» по адресу: 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, ауд. 443

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»
<https://muctr.ru/university/departments/ods/>

Автореферат диссертации разослан «__» ____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета РХТУ.2.6.09 кандидат
технических наук, доцент



В.А. Василенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В промышленности широко распространены тарельчатые аппараты. 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 отличии 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.

Использование противоточных тарелок с отверстиями 20 и 40 мм, было опробовано на промышленных установках производств гранулированных солей с участием автора. Такие тарелки показали хорошую стабильность работы по сравнению с перекрёстноточными тарелками с отверстиями до 12 мм. Результаты исследований по тарелкам с крупными отверстиями нами в открытой печати не найдены.

Степень разработанности темы. В последние 20 - 30 лет были разработаны и получили широкое распространение новые конструкции контактных устройств для газа и жидкости для аппаратов ректификации и абсорбции.

Начиная с 1999 г., когда была опубликована первая работа по CFD-моделированию пенной тарелки, использование данных методов получает всё большее распространение. В последние 10 - 15 лет значительная часть исследований пенных тарелок проводится с использованием CFD-моделирования.

Известные общие методики расчета пенных аппаратов не используют последние экспериментальные результаты, полученные благодаря современным средствам измерений. Последние экспериментальные данные по дисперсионному составу аэрозольных частиц брызгоуноса позволяют более точно рассчитать общую эффективность очистки газа уже на стадии проектирования.

Цель работы: Восполнение недостающих научных данных для проектирования промышленного пенного аппарата с противоточными тарелками и брызгоуловителем (туманоуловителем) и расчёта остаточного содержания загрязняющих веществ в газовых выбросах.

Задачи исследования:

1. Экспериментальное исследование гидродинамических режимов работы пенного аппарата с противоточными тарелками, в том числе с ранее не исследованными типами тарелок;

2. Проверка возможностей известных методик CFD-моделирования для симуляции пенного слоя на противоточных тарелках, адаптация известных методик для противоточной тарелки;

3. Исследование брызгоуноса и влияния его дисперсности на эффективность очистки газа.

Научная новизна:

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 значимость:

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 C_D .

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

5. Разработанные методики расчёта и моделирования противоточных пенных тарелок внедрены в практику проектных организаций. Получены акт о внедрении результатов диссертационной работы в организации АО «Национальная Газовая Компания», справка об апробации результатов научной работы в ООО «Визави Синтез».

Методология и методы исследования. Объектом исследования является вертикальный аппарат с противоточными пенными тарелками. В настоящей работе использовались следующие методы:

1. Физическое моделирование пенного аппарата диаметром 400 мм на смеси воздух – вода с визуальным наблюдением за пенным слоем через прозрачные стенки и измерением параметров работы аппарата: расхода фаз, давления, расхода брызгоуноса;

2. Компьютерное моделирование работы пенной тарелки методом CFD в программах ANSYS и OpenFOAM.

Обоснованность и достоверность результатов обеспечивалась: в части компьютерного моделирования - верификацией полученных результатов на экспериментальной установке полупромышленного масштаба, в остальной части - комплексом теоретических и расчётно-аналитических исследований, который базируется на общих принципах фундаментальной науки и научных основах прогрессивной техники и технологии. Экспериментальные исследования проводились на действующих установках лаборатории кафедры процессов и аппаратов химической технологии РХТУ им. Д.И. Менделеева. Компьютерное моделирование проводилось на лицензированном программном обеспечении РХТУ им. Д.И. Менделеева, а также с использованием свободно распространяемого программного обеспечения.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы представлены на Всероссийских и Международных 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 Российской-Азербайджанской научной конференции, посвященной 880-летию Великого Азербайджанского поэта-просветителя Низами Ганджеви (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».

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований и рекомендации по использованию противоточных пенных тарелок с фиксированными клапанами.
2. Результаты компьютерного моделирования и рекомендации по использованию известных CFD-моделей для пенных тарелок.
3. Методика CFD-моделирования противоточной пенной тарелки, на основе модели взаимопроникающих сред «Эйлера-Эйлера» с расчетом коэффициента лобового сопротивления в зависимости от скорости и объемных долей фаз.
4. Методика расчета общей эффективности очистки газа в аппарате с пенными тарелками и проволочным туманоуловителем с использованием экспериментальных данных по дисперсионному составу частиц капельного брызгоуноса.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных, 1 статья в рецензируемом издании. Результаты научного исследования подтверждены участием на научных мероприятиях: опубликовано 5 работ в материалах всероссийских и международных конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованной литературы включающего 122 наименования, 3 приложений. Работа изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 11 таблиц, 51 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности, сформулированы цель и задачи, отображена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также аprobация результатов работы.

В первой главе проводится литературный обзор, приведены результаты поиска по электронным базам данных научных статей. Рассмотрены тенденции основных тем исследований по пенным тарелкам и пенным режимам.

Во второй главе приведено описание экспериментальной установки пенного слоя, методики и результатов экспериментов по физическому моделированию работы пенной тарелки. Рассмотрены теоретические основы основных параметров гидродинамического режима пенных тарелок и известные эмпирические корреляции экспериментальных результатов. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 1.

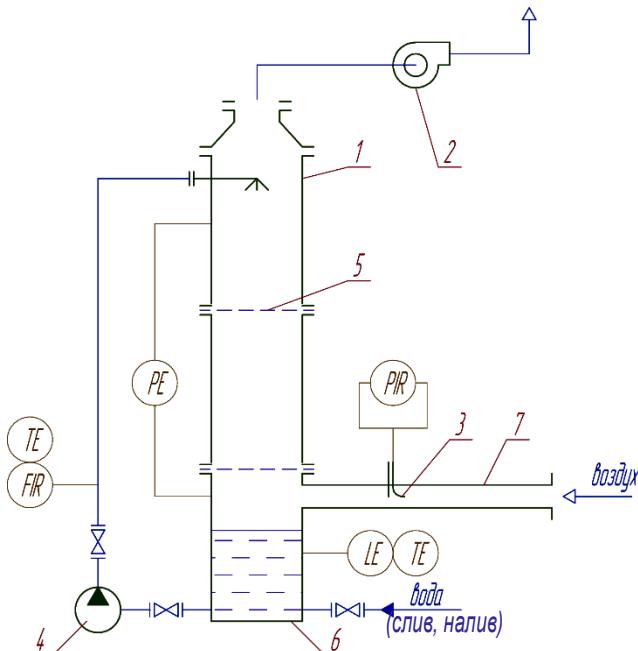


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки. 1 – тарельчатая колонна, 2 – воздуходувка, 3 – трубка Пито-Прандтля, 4 – насос, 5 – тарелка, 6 – куб колонны, 7 – удлинённый патрубок ввода воздуха, LE – указатель уровня, TE – указатель температуры, PIR – дифференциальный манометр с осреднением показаний, PE – дифференциальный манометр, FIR – расходомер с осреднением показаний

Экспериментальная колонна диаметром 400 мм, имеет от одной до трех противоточных тарелок, расстояние между тарелками 750 мм, жидкость, подаваемая в

колонну - вода, газ - воздух при атмосферном давлении. Колонна во время работы показана на рисунке 2.



Рисунок 2 – Пенный слой в работающей установке

Проведены сравнительные тесты противоточных тарелок и с тарелок с фиксированными клапанами, измерен расход брызгоноса. Характеристики испытанных противоточных тарелок приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики тарелок

№	Тип отверстий	d ₀ , mm	N _{отв}	S ₀	ζ _т
1	Круглые отверстия	20	73	0,183	60
2		20	37	0,093	110
3		40	19	0,189	48
4		40	13	0,128	81
5	Фиксированные клапаны	40	19	0,189	68
6		40	13	0,128	130

Полное сопротивления тарелки от скорости газа и высоты слоя чистой жидкости:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho_G \overline{U}_G^2}{2} + h_0 g \rho_L + \frac{4\sigma}{d_0} \quad (1)$$

Где ζ – коэффициент аэродинамического сопротивления сухой тарелки, ρ_G , ρ_L – плотность газа и жидкости, кг/м³, \overline{U}_G – скорость газа, приведённая к свободному сечению аппарата, м/с, h_0 – высота слоя чистой жидкости, м, g – ускорение свободного падения м/с², σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м, d_0 – эквивалентный диаметр отверстия, м.

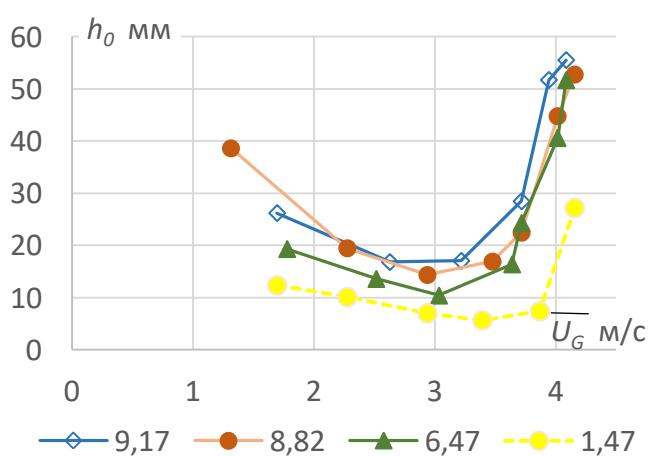
Для противоточных (провальных) тарелок величину нагрузки по жидкости принято определять плотностью орошения, м³/(м²·с):

$$q_L = \frac{L}{A \cdot \rho_L} \quad (2)$$

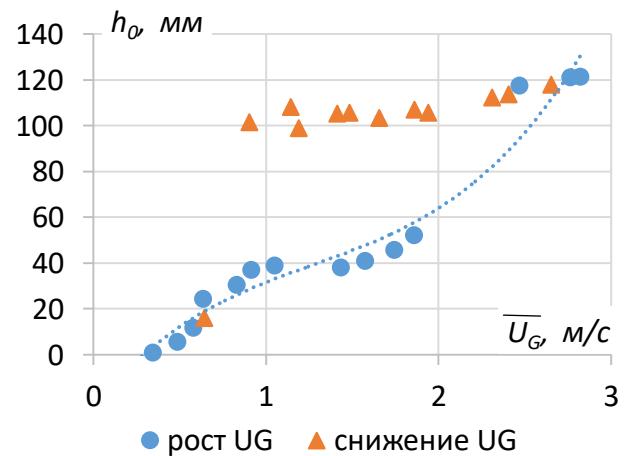
Где L – массовый расход жидкости, кг/с, A – площадь сечения аппарата, м².

Высота слоя чистой жидкости оценивалась по сопротивлению пенного слоя (1) и методом измерения увеличения уровня жидкости в кубе после отсечки подачи газа. Высота пенного слоя на тарелке оценивалась визуально.

Гидродинамический режим работы противоточных пенных тарелок имеет весьма сложный характер. Высота слоя чистой жидкости зависит от скорости газа и плотности орошения. На характер зависимости могут влиять не только свойства газа и жидкости, конструкция тарелки, масштабный фактор (диаметр аппарата), но и, в некоторых случаях, условия вывода тарелки на текущий режим работы. На рисунке 3 показано, что высота слоя чистой жидкости может резко снизиться в рекомендуемом диапазоне скоростей газа для противоточной тарелки 1,5...2,5 м/с. На рисунке 4 показано, что противоточная тарелка может демонстрировать устойчивую работу (в эксперименте более 30 мин) с двумя различными высотами слоя чистой жидкости.



Тарелка №1



Тарелка №4

Рисунок 3 – Высота слоя чистой жидкости на тарелке в зависимости от плотности орошения и скорости газа

Тарелки с фиксированными клапанами показывают более стабильную и предсказуемую зависимость высоты слоя чистой жидкости от скорости газа и могут устойчиво работать при меньших плотностях орошения, что в промышленных условиях позволит снизить энергозатраты на циркуляцию промывных растворов.

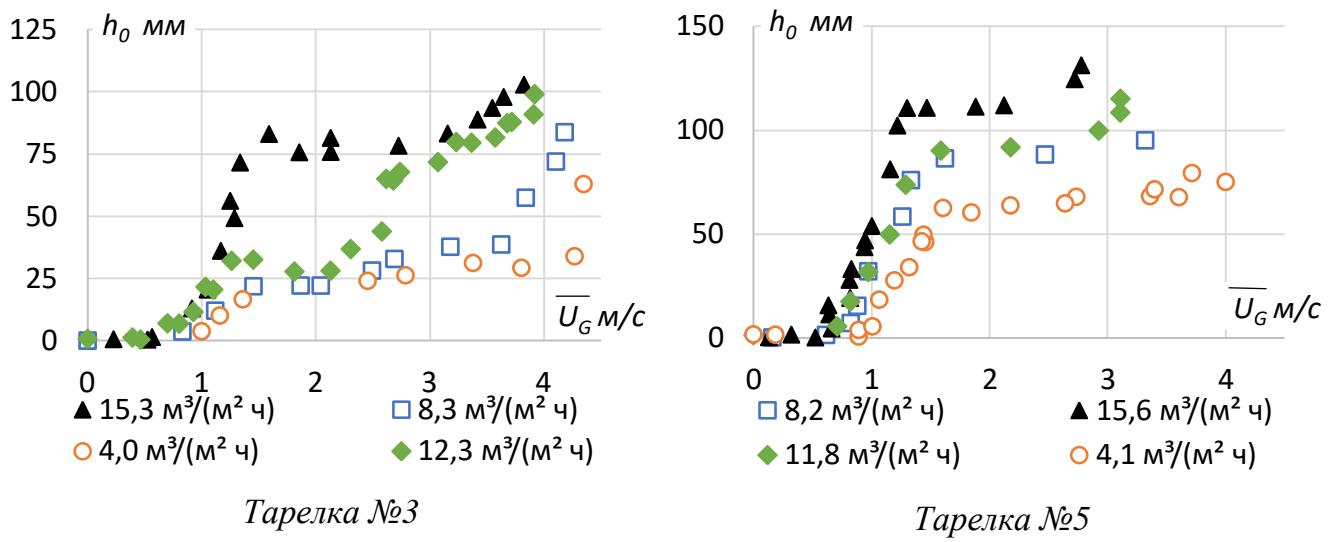


Рисунок 4 – Высота слоя чистой жидкости на тарелках с отверстиями и фиксированными клапанами

Расход брызгоуноса оценивался по скорости убывания воды в системе с учетом поправки на испарение воды, принимается, что относительная влажность воздуха на выходе из колонны 100%. Плотность брызгоуноса определена как отношение расхода уносимой жидкости к площади тарелки с учетом поправки на испарение воды:

$$q_E = \left(\frac{V_k - V_h}{\tau} - \frac{G}{\rho_G} \left(1 - \frac{RH}{100\%} \right) \frac{\rho_{h.p.}}{\rho_L} \right) \frac{1}{A} \quad (3)$$

Где V_k , V_h - конечный и начальный объем жидкости в кубе колонны м^3 , τ - время эксперимента, сек, G - расход газа (воздуха), $\text{кг}/\text{с}$, ρ_G , ρ_L - плотность газа жидкости $\text{кг}/\text{м}^3$, RH - относительная влажность газа (воздуха) на входе в установку, $\rho_{h.p.}$ - плотность водяного пара, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Результаты измерений брызгоуноса показаны на рисунке 5.

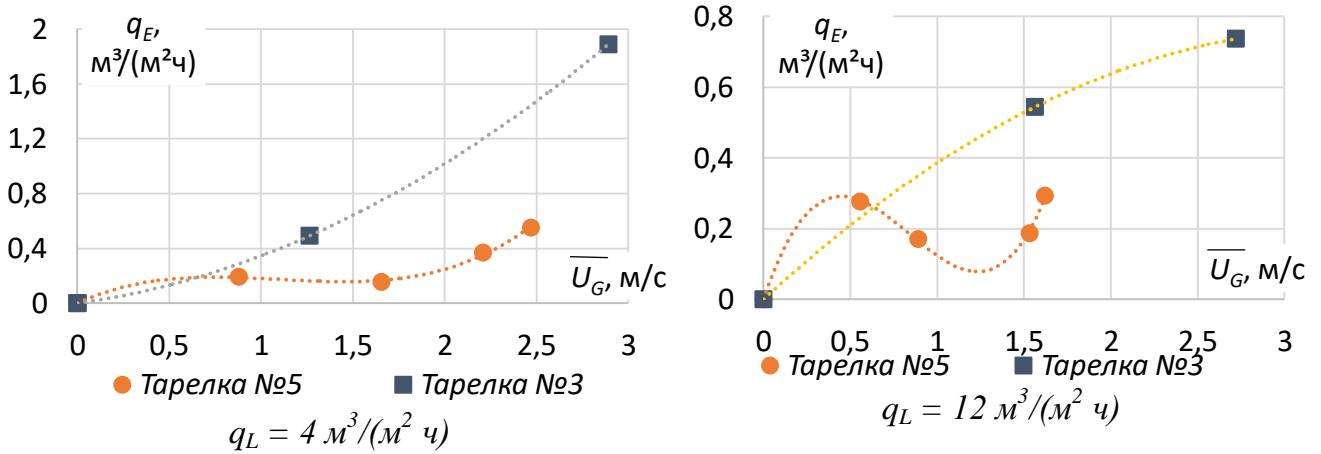


Рисунок 5 – Плотность брызгоуноса, в зависимости от скорости наза и плотности орошения

Тарелки с фиксированными клапанами, имеют меньший расход брызгоуноса, с локальным минимумом в области скоростей газа 1...1,5 м/с.

Объемное содержание жидкости в пенном слое определено по формуле:

$$\varepsilon_L = \frac{h_0}{h_n} \quad (4)$$

Где h_n – высота пенного слоя, м.

На основании наблюдений и статистического анализа выявлено, что значимым фактором, влияющим на объемную долю жидкости в пенном слое, является скорость газа U_G , м/с, влиянием фактора плотности орошения и типа тарелки можно пренебречь. Хорошую корреляцию с экспериментальными результатами, коэффициент $r^2 = 0,89$, даёт известная формула Беннета (несмотря на то, что она была получена для перекрёстноточных тарелок):

$$\varepsilon_L^B = e^{-12,55 \left(\frac{U_G}{\sqrt{\rho_G}} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}} \right)^{0,91}} \quad (5)$$

Экспериментальные результаты по объемной доли жидкости в пенном слое показаны на рисунке 6.

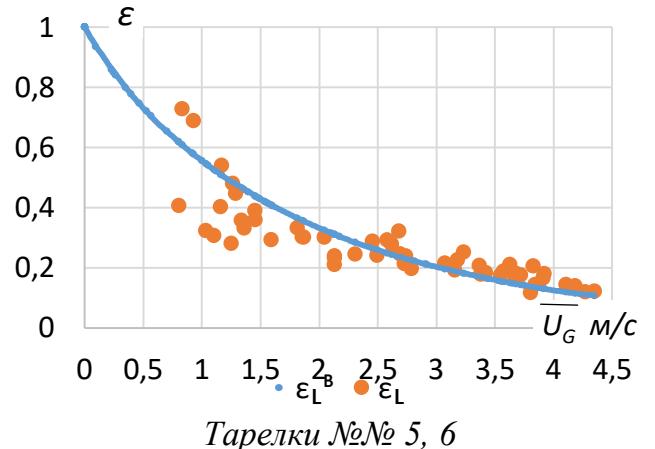
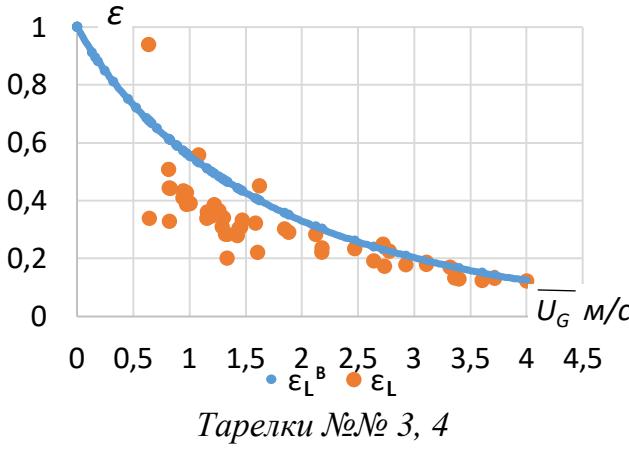


Рисунок 6 – Объемная доля жидкости в пенном слое

В третьей главе рассматриваются методики CFD-моделирования пенного слоя на противоточной тарелке. Известны несколько подходов к CFD-моделированию двухфазных потоков. Наибольшее распространение получила модель взаимопроникающих сред (Эйлера-Эйлера), меньше используется модель объемной доли жидкости (VOF).

VOF модель. Преимуществом модели является то, что уравнения движения фаз в ней не используют эмпирические константы, связанные с конкретной конструкцией

пенной тарелки, как это приходится делать для модели взаимопроникающих сред. Известно, что данная модель требует достаточно мелкой сетки конечных элементов, чтобы точнее описывать положение границы раздела фаз и не рекомендуется для сильно диспергированных многофазных потоков, однако граница применимости по отношению к модели пенного слоя или барботажа установлена не была.

Для моделирования использована программа OpenFOAM, решатель InterFoam, нестационарный процесс по времени, модель турбулентности kOmegaSSTDES (подобрана по максимальной устойчивости расчёта). Выполнен расчет для перепадов давлений на тарелке от 200 до 1200 Па, плотность орошения $4,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Геометрия модели соответствует тарелке №2.

Средняя скорость в аппарате по результатам CFD-моделирования определена как интеграл скорости по границе выхода газа, отнесённый к площади поверхности:

$$U_A = \frac{\sum_i UY_i \cdot A_i}{\sum_i A_i} \quad (6)$$

Где UY_i – средний Y-компонент скорости в грани конечного элемента, м/с, A_i – площадь грани конечного элемента

Высота чистой жидкости на тарелке по результатам CFD-моделирования определена как интеграл объемной доли жидкости по области над тарелкой, отнесённый к площади сечения аппарата

$$h_0 = \frac{\sum_i \alpha_i \cdot V_i}{A} \quad (7)$$

Близкие к экспериментальным результаты моделирования были получены для общего перепада давления на тарелке не более 500 Па, при больших перепадах давления CFD-модель тарелки переходила в захлёбывание, чего не наблюдалось в эксперименте.

Высота слоя чистой жидкости на тарелке, полученная по результатам моделирования, и сравнение с экспериментальными данными показана на рисунке 7 (h_0 определена по уровню в кубе колонны).

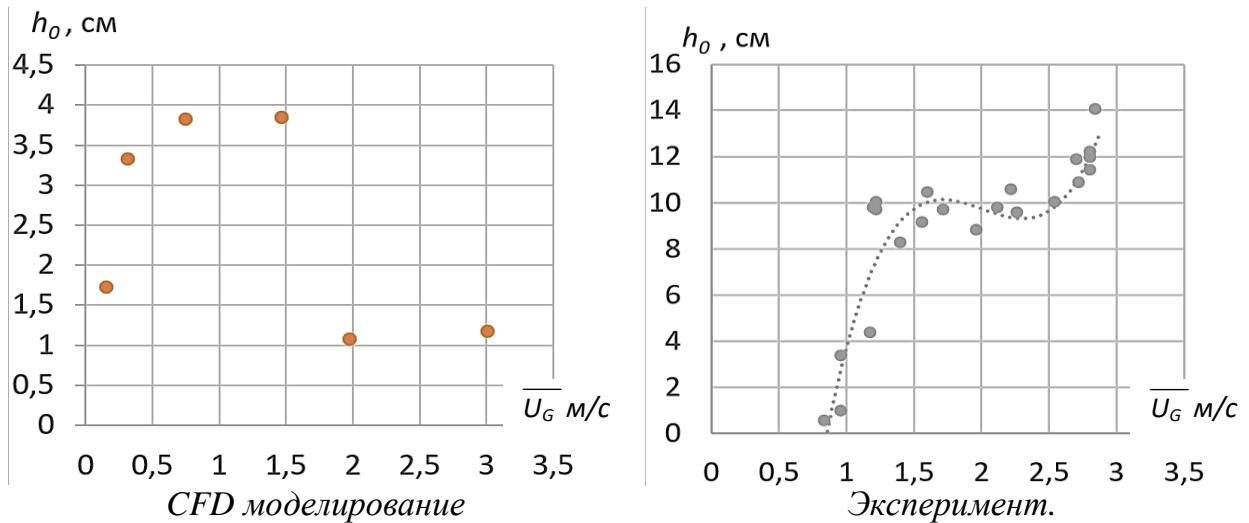


Рисунок 7 – Высота слоя чистой жидкости на тарелке №2,

плотность орошения $4,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Модель Эйлера-Эйлера (взаимопроникающих сред). При моделировании пенный слой рассматривают как пузырьки газа, всплывающие в жидкости, либо как капли жидкости в восходящем потоке газа. В установившемся режиме скорости фаз постоянны, тогда для дисперсной газовой фазы можно составить уравнение равенства силы Архимеда и суммы силы сопротивления и силы тяжести, действующих на частицу газа:

$$\rho_L g \frac{\pi d_G^3}{6} = C_D^G \frac{\pi d_G^2}{4} \frac{\rho_L U_{\text{slip}}^2}{2} + \rho_G g \frac{\pi d_G^3}{6} \quad (8)$$

Где d_G – диаметр частицы условно дисперсной фазы, C_D – коэффициент сопротивления (безразмерный), U_{slip} – фактическая относительная скорость фаз, м/с.

$$U_{\text{slip}} = \frac{U_G}{1 - \varepsilon_L} - \frac{U_L}{\varepsilon_L} \quad (9)$$

Здесь U_L , U_G – локальные вертикальные скорости жидкости и газа в элементарном объеме, м/с, а объемная доля жидкости определяется по формуле (5), причём с использованием локальной поверхностной скорости газа. Тогда можно вывести формулу для коэффициента сопротивления:

$$C_D^G = \frac{4}{3} \frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_L} \text{gd} \frac{1}{U_{\text{slip}}^2} \quad (10)$$

Уравнение сохранения импульса Навье-Стокса для двухфазного потока:

$$\frac{\delta}{\delta t} (\varepsilon_G \rho_G \vec{U}_G) + \nabla \left(\varepsilon_G (\rho_G |\vec{U}_G|^2) \right) = -\varepsilon_G \nabla p + \nabla \left(\varepsilon_G \mu_G (\nabla \vec{U}_G + (\vec{U}_G)^T) \right) + \vec{S}_G + \vec{M}_G \quad (11)$$

$$\frac{\delta}{\delta t} (\varepsilon_L \rho_L \vec{U}_L) + \nabla \left(\varepsilon_L (\rho_L |\vec{U}_L|^2) \right) = -\varepsilon_L \nabla p + \nabla \left(\varepsilon_L \mu_L (\nabla \vec{U}_L + (\vec{U}_L)^T) \right) + \vec{S}_L + \vec{M}_L \quad (12)$$

Где S_G , S_L – сумма внешних объемных сил, в том числе силы тяжести, $\text{Н}/\text{м}^3$, M_G , M_L – объемная сила, действующая на фазу со стороны другой фазы, $\text{Н}/\text{м}^3$:

$$\vec{M}_L = -\vec{M}_G = C_D^{\text{dim}} (\vec{U}_G - \vec{U}_L) \quad (13)$$

Где C_D^{dim} – размерный коэффициент сопротивления определяемый как:

$$C_D^{\text{dim}} = C_D^G \frac{1}{d} \frac{3}{4} \varepsilon_G \rho_L |\vec{U}_G - \vec{U}_L| = \frac{g \cdot \varepsilon_L (\rho_L - \rho_G)}{U_{\text{slip}}^2} |\vec{U}_G - \vec{U}_L| \quad (14)$$

Данная методика расчёта широко используется для моделирования перекрестноточных тарелок для относительно небольших скоростей (до 1...1,5 м/с), но оказалось, что для противоточной тарелки она не подходит. При скоростях газа выше 1 м/с CFD-модель показывала завышенные значения высоты слоя чистой жидкости (по сравнению с экспериментом), далее тарелка быстро переходила в захлёбывание.

Адаптация модели для противоточной тарелки. Предложена скорректированная модель с ограничениями на коэффициент лобового сопротивления в зависимости от объемной доли жидкости и скорости газа. Коэффициент лобового сопротивления должен принимать достаточно большие значения только при тех скоростях газа и объемной доли жидкости, когда в эксперименте существует пенной слой. Пенный слой начинает образовываться примерно с 0,5 м/с, при этом объемная доля жидкости должна быть от 10% и выше. Так же для устойчивости модели необходимо обеспечить гладкость и непрерывность используемых уравнений во всем возможном диапазоне значений, которые переменные могут принимать во время расчёта.

На основе численных экспериментов определен метод расчета коэффициента сопротивления на основе уравнений:

$$A = \frac{\text{atctg}(A_1 A_2) - \text{atctg}((A_1 - \varepsilon_L) A_2)}{\text{atctg}(A_1 A_2) - \text{atctg}((A_1 - 1) A_2)} A_3 \quad (15)$$

$$B = \left(\frac{1}{\pi} \text{acrtg}((U_G - B_1) B_2) + 0,5 \right) A + B_3 \quad (16)$$

$$C_D = \min(C_D^B; B) \quad (17)$$

Где: $A_1 = 0,15$, $A_2 = 40$, $A_3 = 2,3$, $B_1 = 0,3$ м/с, $B_2 = 10$ (м/с)⁻¹, $B_3 = 0,2$. Результаты расчета C_D по формуле (17) для значений $\varepsilon_L = 0,1, 0,15, 0,9$, и, для сравнения, расчет по формуле (10) с учетом ограничения значений, приведены на рисунке 8.

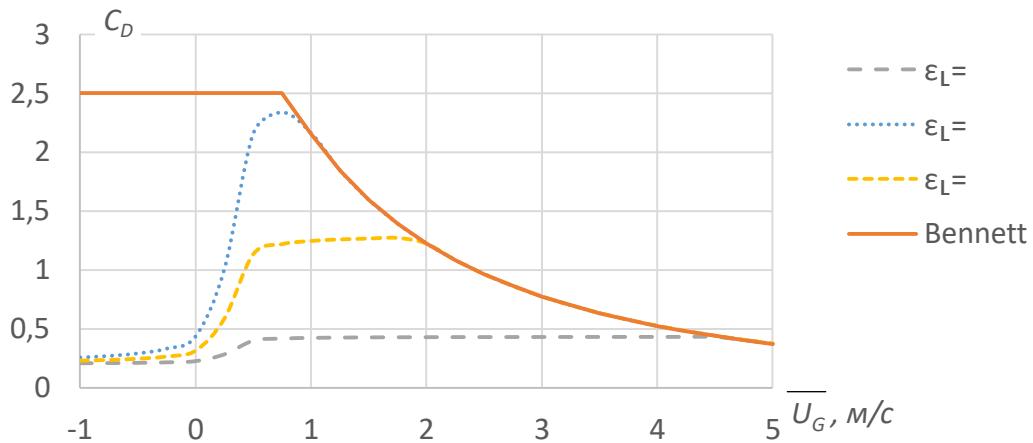


Рисунок 8 – Коэффициент сопротивления для адаптированной модели

На рисунке 9 приведены результаты CFD-моделирования по высоте слоя чистой жидкости на противоточной тарелке в сравнении с результатами физического эксперимента (h_0 определена по сопротивлению пенного слоя)

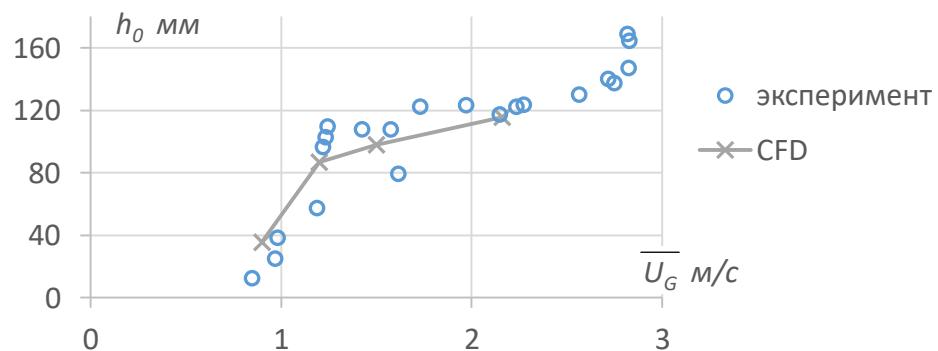
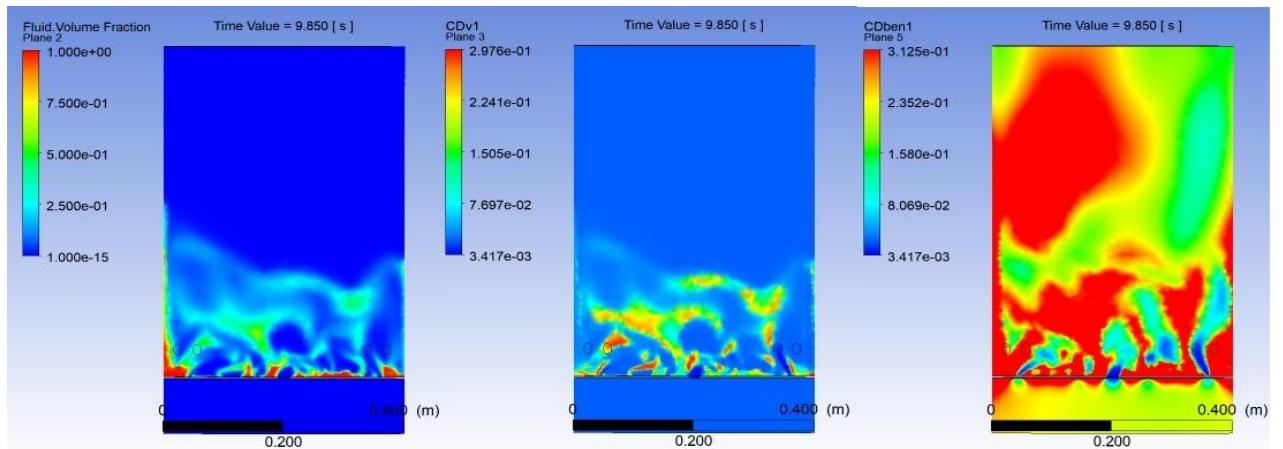


Рисунок 9 – Высота слоя чистой жидкости, на тарелке №2, $q_L = 4,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$

Объемные доли жидкости в пенном слое при $\overline{U_G} = 1,4 \text{ м/с}$ и рассчитанные коэффициенты сопротивления C_D показаны на рисунке 10.



объемная доля жидкости

коэффициент C_D (17)

коэффициент C_D (10)

Рисунок 10 – Результаты моделирования пенного слоя при $\overline{U_G} = 1,4 \text{ м/с}$

Использование методики расчета C_D , адаптированной для противоточной тарелки, обеспечивает максимальные значения коэффициента сопротивления (и межфазной силы) только в зоне объемных долей жидкости и скоростей, соответствующих существованию пенного слоя в эксперименте. Использование не адаптированной методики на основе корреляции Беннетта привело бы к преобладанию в расчетной области зон с максимальными значениями C_D .

В четвёртой главе рассматривается влияние брызгоуноса на остаточное загрязнение газа после очистки в пенном аппарате (абсорбере) с учетом экспериментальных данных о дисперсности брызгоуноса.

Эксперименты с противоточными тарелками с фиксированными клапанами показывают, что общий расход уноса имеет локальный минимум в зоне скоростей газа 1...2 м/с. Полученные экспериментальные результаты по расходу брызгоуноса для тарелки №5, при $q_L = 4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$ аппроксимируются формулой:

$$L_E = 0,0391 \overline{U_G}^3 - 0,1527 \overline{U_G}^2 + 0,1607 \overline{U_G} \quad (18)$$

Удельный расход тонкодисперсного уноса (диаметр капли менее 5 мкм) на несколько порядков ниже расхода грубодисперсного (и общего), однако, с учетом сложности улавливания капель микронных размеров, он может вносить заметный вклад в остаточное содержание загрязняющих веществ в газе. По известным экспериментальным данным:

$$L_E^{1\text{t}} = 3,1572 \cdot 10^{-6} \overline{U_G}^3 - 13,026 \cdot 10^{-6} \overline{U_G}^2 + 14,721 \cdot 10^{-6} \overline{U_G} \quad (19)$$

Для описания дисперсного состава использована функции распределения, уравнение Розина-Рамлера:

$$R_3 = \exp \left(- \left(\frac{d_i}{a_m} \right)^{n_R} \right) \quad (20)$$

где R_3 – объемная доля капель, диаметр которых больше d_i (в общем объеме брызгоуноса), a_m – постоянная размера, м; n_R – постоянная распределения. Функция частоты:

$$I_{p3} = - \frac{\partial}{\partial d_i} R_3 = R_3 \frac{n_R}{a_m} \left(\frac{d_i}{a_m} \right)^{n_R-1} \quad (21)$$

По известным экспериментальными результатам, постоянную размера грубого брызгоуноса, мкм, можно определять по формуле:

$$a_m = 530 \overline{U}_G \quad (22)$$

Известна методика расчета эффективности проволочного туманоуловителя, для скоростей газа от 0,9 до 5,5 м/с:

$$St = \frac{\rho_L D_d^2 \overline{U}_G}{18 \mu_G D_w} \quad (23)$$

$$\eta_m = \begin{cases} St \text{ if } St < 1 \\ 1 \text{ if } St \geq 1 \end{cases} \quad (24)$$

$$\eta = 1 - \left(1 - \frac{2}{3} a_{\text{уд}} \eta_{ST} \frac{z}{\pi} \right)^n \quad (25)$$

Где St – критерий Стокса, z – расстояние между слоями сетки, м, n – число слоёв сетки в туманоуловителе, D_d – диаметр частицы, м, D_w – диаметр проволоки, м.

$$n = t_m / z \quad (26)$$

Расход тонкодисперсного и грубодисперсного брызгоуноса перед туманоуловителем.

$$L_E^T = L_E^{1T} \cdot \sum_{i=1}^{N_T} \eta_{\text{п.т.}}^{i-1} \quad (27)$$

Где $\eta_{n.m.}$ – эффективность улавливания тонкодисперсного уноса (тумана) в пенном слое N_T – число тарелок в пенном аппарате, L_E^{1T} – расход тонкодисперсного уноса с одной тарелки, ф-ла (19).

Общая эффективность туманоуловителя:

$$\eta_{DSD} = \int_0^{D_{max}} I_{p3}(D_d) \cdot \eta_m(D_d) \cdot dD_d \quad (28)$$

Где D_{max} – максимальный диаметр частиц уноса, м, I_{p3} – функция частоты по объему частиц в зависимости от диаметра частицы, ф-ла (21), η_m – эффективность туманоуловителя в зависимости от диаметра частицы, ф-ла (25).

При автоматизированных расчетах по ф-ле (25), могут возникать ошибки из-за того, что используемая функция (24) не гладкая в окрестности 1, в таком случае, можно использовать сглаживание функции по методу:

$$K_{\text{сгл}}(St) = 0,5 - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg}(K_{\text{точн}} \cdot (St - 1)) \quad (29)$$

Где $K_{\text{сгл}}(St)$ – функция сглаживания, $K_{\text{точн}} = 40$ – коэффициент точности.

Сглаженная функция эффективности одного слоя сетки туманоуловителя:

$$\eta_m^{\text{рл}} = St \cdot K_{\text{срл}}(St) + (1 - K_{\text{срл}}(St)) \quad (30)$$

Остаточное содержание жидкости в газе после туманоуловителя:

$$L_E^{\text{ост}} = L_E^{\text{г}} \cdot (1 - \eta_{DSD}^{\text{г}}) + L_E^{\text{т}} \cdot (1 - \eta_{DSD}^{\text{т}}) \quad (31)$$

Где $L_E^{\text{г}}$ – расход грубодисперсного уноса, ф-ла (16), $\eta_{DSD}^{\text{г}}$ – эффективность туманоуловителя для грубодисперсного уноса, $L_E^{\text{т}}$ – расход тонкодисперсного уноса, ф-ла (27), $\eta_{DSD}^{\text{т}}$ – эффективность туманоуловителя для тонкодисперсного уноса.

Остаточное содержание загрязняющих веществ:

$$L^{\text{ост}} = L_E^{\text{ост}} \cdot x_m \quad (32)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании пенного аппарата с противоточными тарелками ключевой задачей является обеспечение устойчивой работы пенного слоя, а именно: определение диапазона нагрузок (по фазам), при которых на тарелках существует пенный слой, а его пульсации не приводят к проскоку газа мимо жидкости и тарелка не переходит в режим захлебывания.

Предлагается использовать подход, в котором объединены методы аналитического расчета, компьютерного моделирования и экспериментальных исследований. Каждый из этих методов по отдельности либо дорог, либо не даёт корректных результатов. Для получения гарантированно работающего аппарата промышленного масштаба нужно использовать их комбинацию с упором на компьютерное моделирование, как это показано в настоящей работе.

Последние экспериментальные данные по дисперсному составу брызгоуноса позволяют проводить расчет остаточного содержания загрязняющих веществ в выхлопе пенного аппарата (абсорбера) на стадии проектирования, а также проводить оптимизационные расчеты размеров аппарата.

Выводы:

1. Проведено физическое моделирование пенного слоя на противоточных тарелках с фиксированными клапанами. Показано, что тарелки с фиксированными клапанами имеют преимущества по сравнению с тарелками с круглыми отверстиями.
2. Проведено CFD-моделирование работы противоточной пенной тарелки методом объемной доли жидкости (VOF) в программном пакете OpenFOAM, проведено

CFD-моделирование работы противоточной пенной тарелки моделью взаимопроникающих сред («Эйлера-Эйлера») в программном пакете ANSYS.

3. Предложена методика вычисления коэффициента сопротивления C_D , адаптированная для противоточных тарелок, показавшая хорошее совпадение с экспериментом по высоте слоя чистой жидкости на тарелке. Данная модель может быть использована для изучения поля локальных скоростей газа и жидкости в пенном слое, определения объемных долей фаз в пенном слое, оптимизации конструкции пенных аппаратов.

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

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

Тарелки с фиксированными клапанами могут быть использованы в аппаратах очистки газов от пыли производств минеральных удобрений. Изготовление таких тарелок уже освоено промышленностью для ректификационных колонн, а внедрение их в другие пенные аппараты не требует высоких затрат.

Использование возможностей вычислительной гидродинамики CFD при проектировании колонных аппаратов в дополнение к физическому моделированию позволяет существенно сократить затраты, снизить стоимость и повысить качество работ. Методика моделирования, откалиброванная на определённой конструкции тарелки, позволяет в короткие сроки исследовать влияние вариаций конструктивных размеров и находить оптимальную конфигурацию.

Использование методики проектного расчета пенных аппаратов (абсорбера) с проволочным туманоуловителем позволяет на стадии проекта определить степень очистки газа. Для апробации данной методики следует её использовать и накапливать сведения о соответствии результатом расчета и реальных выбросов загрязняющих веществ.

Список работ, опубликованных автором:

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, Сумгайт, 18 – 19 ноября 2021 года. Том 7. – SUMQAYIT: Сумгайтский государственный университет, 2021. – С. 37.

8. Аганичева И.В. Эффективность улавливая брызгоуноса проволочным туманоуловителем / И.В. Аганичева, В.Е. Яшин // Интенсификация тепломассообменных 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.