На правах рукописи

Салахова Эльмира Ильгизяровна

УЛАВЛИВАНИЕ КАТАЛИЗАТОРА СЕПАРАЦИОННЫМ УСТРОЙСТВОМ С ДУГООБРАЗНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ В РЕАКТОРАХ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ

2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Научный руководитель:	доктор технических наук, доцент, **Дмитриев Андрей Владимирович**
Официальные оппоненты:	**Пахомов Максим Александрович,** доктор физико-математических наук, профессор РАН, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории «Термогазодинамика»;
	Меренцов Николай Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств».
Ведущая организация:	федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет», г. Иваново.

Защита диссертации состоится 12 апреля 2024 г. в 14 час. 00 мин на заседании диссертационного совета 24.2.312.05, созданном на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420015, г. Казани, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседания Ученого совета А-330, Ученый совет.

В отзыве указываются фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронный почты (при наличии), наименование организации и должность лица с указанием структурного подразделения, представившего отзыв (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней), специальность по защите диссертации.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=483417.

Автореферат диссертации разослан «____»_____2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.312.05, кандидат технических наук		Дмитриева Оксана Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В химической и нефтехимической промышленности широко применяются реакторы с псевдоожиженным слоем для дегидрирования изопарафинов. Конечным продуктом является получение олефинов, потребность в которых увеличивается. По данным компании «Data Bridge» ожидается, что среднегодовой рост олефинов в мире к 2029 г. составит около 4,75 %. Прогнозируется, что мировой рынок олефинов к 2029 г. вырастит до 347,9 млрд. долларов. Крупными производителями являются ПАО «СИБУР Холдинг», Shell и другие компании. Таким образом, потребность в реакторах и повышении их эффективности будет увеличиваться.

Одним из важных элементов реакторов с псевдоожиженным слоем является сепарационное оборудование, предназначенное для улавливания катализатора из газового потока на выходе из реактора и его возврата в зону псевдоожижения. Наиболее распространенными аппаратами являются возвратно-поточные циклоны, обеспечивающие высокую эффективность улавливания катализатора при относительно низких эксплуатационных затратах. Однако, циклоны имеют существенные недостатки, приводящих к экономическим издержкам и ухудшению работы реактора с псевдоожиженным слоем. Вследствие высоких рабочих скоростей на входе в циклонные сепараторы при столкновении частиц катализатора со стенками происходит их измельчении, часть катализатора превращается в пыль. С другой стороны, стенки циклонов подвержены быстрому эрозионному износу, образуются щели, что приводит к снижению эффективности аппаратов и потери катализатора. Высокое гидравлическое сопротивление циклонов не позволяет их использовать в реакторах при эффективных рабочих скоростях газа. В результате гидравлическое сопротивление уменьшают путем снижения скорости газа, но для сохранения эффективности используют несколько последовательно соединенных циклонов, что приводит к их громоздкости и высокой металлоемкости. В этой связи работа, посвященная разработке нового сепарационного устройства в качестве замены циклонных сепараторов в реакторах с псевдоожиженным слоем, является актуальной.

Степень научной разработанности проблемы. Современное состояние решения задач о системах сепарационного оборудования в аппаратах химической технологии отражено в трудах Медникова В.П., Войнова Н.А., Поникарова И.И., Лаптева А.Г., Тимонина А.С., Завьялова С.В., Лазарева В.А., Владимирова А.И., Пахомова М.А., Василевского М.В., Ветошкина А.Г., Фарахова М.И., Махоткина А.Ф. и др. Среди зарубежных и отечественных компаний, которые занимаются исследованием и внедрением сепарационного оборудования стоит отметить: ОАО «НИИОГАЗ» (Россия), TurboSonic Technologies Inc. (США), BWF TEC GmbH & Co. KG (Германия), Scheuch GmbH (Австрия) и др.

Объектом исследования является процесс улавливания частиц катализатора из газов сепарационным устройством с дугообразными элементами.

Предметом исследования является эффективность процесса улавливания частиц катализатора из газов сепарационным устройством с дугообразными элементами в зависимости от их размера, конструктивных параметров устройства и технологических параметров.

Цель работы и основные задачи исследования. Целью является разработка

и исследование процессов в сепарационном устройстве с дугообразными элементами для улавливания катализатора в реакторах с псевдоожиженным слоем.

В непосредственные задачи исследования входило:

1. На основе анализа недостатков существующих аппаратов улавливания твердых частиц в реакторах с псевдоожиженным слоем разработать новую конструкцию сепарационного устройства, позволяющую снизить энергетические затраты, увеличить общую эффективность, повысить эрозионную стойкость и обеспечить удобство его эксплуатации и ремонта.

2. Экспериментальным путем определить эффективность и гидравлическое сопротивление сепарационного устройства с дугообразными элементами от скорости газа на входе в установку.

3. Изучить влияние расходных характеристик потока, размера мелкодисперсных частиц на эффективность работы сепарационного устройства при различных конструктивных параметрах его исполнения.

4. Провести численные исследования эрозионного износа сепарационного устройства с дугообразными элементами.

5. Разработка инженерной методики расчета сепарационного устройства в реакторах с псевдоожиженным слоем.

6. Технико-экономическое обоснование применения сепарационного устройства в реакторах с псевдоожиженным слоем.

Методология и методы исследований. Применялись методы математического моделирования, адекватность результатов которых подтверждалась сравнением с экспериментальными данными, полученными на экспериментальной установке. Для расчетов и построения графических зависимостей гидравлического сопротивления, эффективности сепарационного устройства с дугообразными элементами от скорости газа, эрозионного износа сепарационного устройства от размера частиц использовались прикладные программы ANSYS Fluent и Microsoft Excel. Расходомер Вентури изготавливался согласно ГОСТу 8.586.4-2005 ГСИ.

Научная новизна работы:

1. Экспериментально получены обобщенные зависимости по гидравлическому сопротивлению и эффективности сепарационного устройства с дугообразными элементами в лабораторном модуле от скорости газа на входе в установку. Установлена зависимость эффективности сепарационного устройства с дугообразными элементами от размера частиц 10-208 мкм и скорости газа от 0,87 до 2,43 м/с.

2. В результате численных исследований получены зависимости эффективности сепарационного устройства от количества рядов и диаметра дугообразных элементов при различной скорости газа на входе.

3. Проведенные численные исследования позволили получить зависимости для определения эрозионного износа сепарационного устройства с дугообразными элементами от размера частиц.

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов математического моделирования подтверждается использованием фундаментальных уравнений сохранения переноса массы и импульса, а также удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных данных.

Достоверность опытных данных подтверждается их воспроизводимостью в однотипных сериях экспериментов, а также использованием для их получения современного, сертифицированного и поверенного оборудования.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана конструкция сепарационного устройства с дугообразными элементами для улавливания катализатора в реакторах с псевдоожиженным слоем, которая отличается от известных циклонов тем, что работают при низких скоростях, это приводит к снижению гидравлического сопротивления, износа стенок, частиц катализатора и высокой эффективности улавливания частиц до 30 мкм.

2. Разработана инженерная методика расчета сепарационного устройства для улавливания частиц катализатора из газов в реакторах с псевдоожиженным слоем.

3. Целесообразность использования сепарационного устройства в качестве замены циклонам в реакторах с псевдоожиженным слоем подтверждена исследованиями по эрозионному износу стенок.

4. Показана технико-экономическая целесообразность использования разработанного сепарационного устройства с дугообразными элементами в реакторах с псевдоожиженным слоем в качестве замены циклонных сепараторов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных и численных исследований эффективности улавливания частиц, гидравлического сопротивления сепарационного устройства с дугообразными элементами.

2. Результаты математического моделирования по влиянию расходных характеристик потока, размера мелкодисперсных частиц на эффективность работы сепарационного устройства при различных конструктивных параметрах его исполнения.

3. Результаты численных исследований по эрозионному износу сепарационного устройства.

4. Инженерная методика расчета сепарационного устройства, позволяющая определить его конструктивные параметры, скорость газа на входе, эффективность и гидравлическое сопротивление.

Апробация работы. Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на VI Международной научной конференции «AGRITECH-VI 2021: Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development» (Красноярск, 2021 г.); XXVI Всероссийском аспирантско-магистерском научном семинаре, посвященному «Дню энергетика» (Казань, 2022 г.); Международной научно-практической конференции «Развитие современной науки и технологий в условиях трансформационных процессов» (Москва, 2022 г.); Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения – 2023 «Энергетика и цифровая трансформация» (Казань, 2023 г.); VII Международной студенческой научной конференции (Ульяновск, 2023 г.); VII Международной научно-практической конференции «Булатовские чтения» (Краснодар, 2023 г.); XIX Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2023 г.).

Публикация работы. По материалам диссертации опубликовано 15

печатных работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, 5 статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных цитирования Scopus.

Личный вклад автора. Автор лично участвовал в постановке цели и задач исследований, разработке конструкции устройства, инженерной методики расчета, в проведении экспериментальных и численных исследований, проведении расчетов, анализе и обработке результатов, формулировании выводов, подготовке статей для публикации.

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий и охватывает следующие направления исследований: 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. 6. Способы, приемы, методология исследования механических процессов, совершенствование их аппаратурного оформления; 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.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и содержит 149 страниц машинописного текста, которая включает 72 иллюстраций, 11 таблиц. Список литературы состоит из 149 источников.

Автор выражает благодарность к.т.н., доценту Дмитриевой Оксане Сергеевне за соруководство и участие в выполнении диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования. Показана научная и практическая значимость полученных результатов. Обозначены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе сделан анализ современных подходов к сепарации катализатора в реакторах с псевдоожиженным слоем. Показано, что унос катализатора газовым потоком из реакторов приводит к экономическим издержкам и экологическим последствиям. Данная проблема применима к реакторам всех видов. Для улавливания катализатора и его возврата в псевдоожиженный слой наиболее распространенными аппаратами является возвратно-поточные циклоны, устанавливаемые в верхней части реактора. Зачастую несколько циклонов соединяются последовательно для снижения гидравлического сопротивления. Обзор отечественных и зарубежных работ по усовершенствованию циклонов позволил выделить следующие ключевые проблемы при их работе в реакторах с псевдоожиженным слоем: 1) высокое гидравлическое сопротивление циклонов; 2) большие потери катализатора и его измельчение при столкновении со стенками циклонов при высоких рабочих скоростях; 3) эрозионный износ циклонов,

приводящий к снижению их эффективности; 4) громоздкость и высокая металлоемкость циклонов.

Во второй главе представлены экспериментальные и численные исследования по улавливанию частиц катализатора в предлагаемом сепарационном устройстве с дугообразными элементами (рис. 1, *а*) в качестве замены циклонам в реакторах с псевдоожиженным слоем.

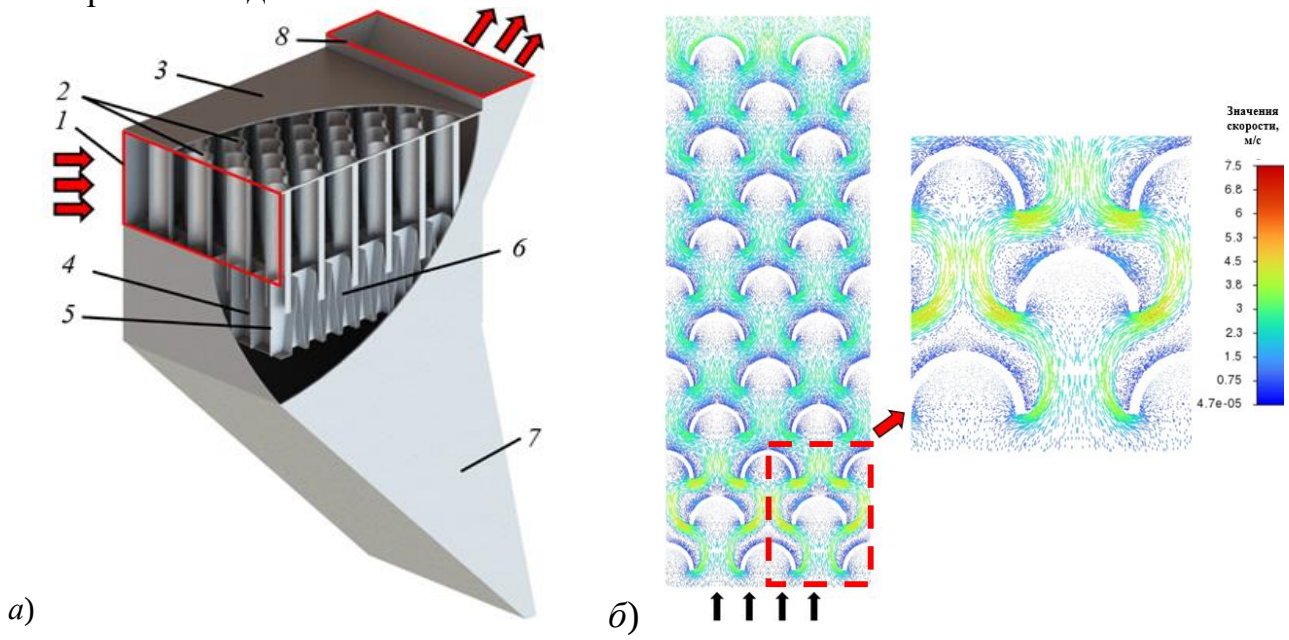


Рисунок 1 – *а*) Сепарационное устройство с дугообразными элементами (вид с разрезом): *1* – входной патрубок; *2* – дугообразные элементы; *3* – корпус; *4* – сепарационная решетка; *5* – продольные пластины; *6* – поперечные *V* – образные пластины; *7* – бункер; *8* – выходной патрубок; *б*) образование волнообразной структуры газового потока (вид сверху)

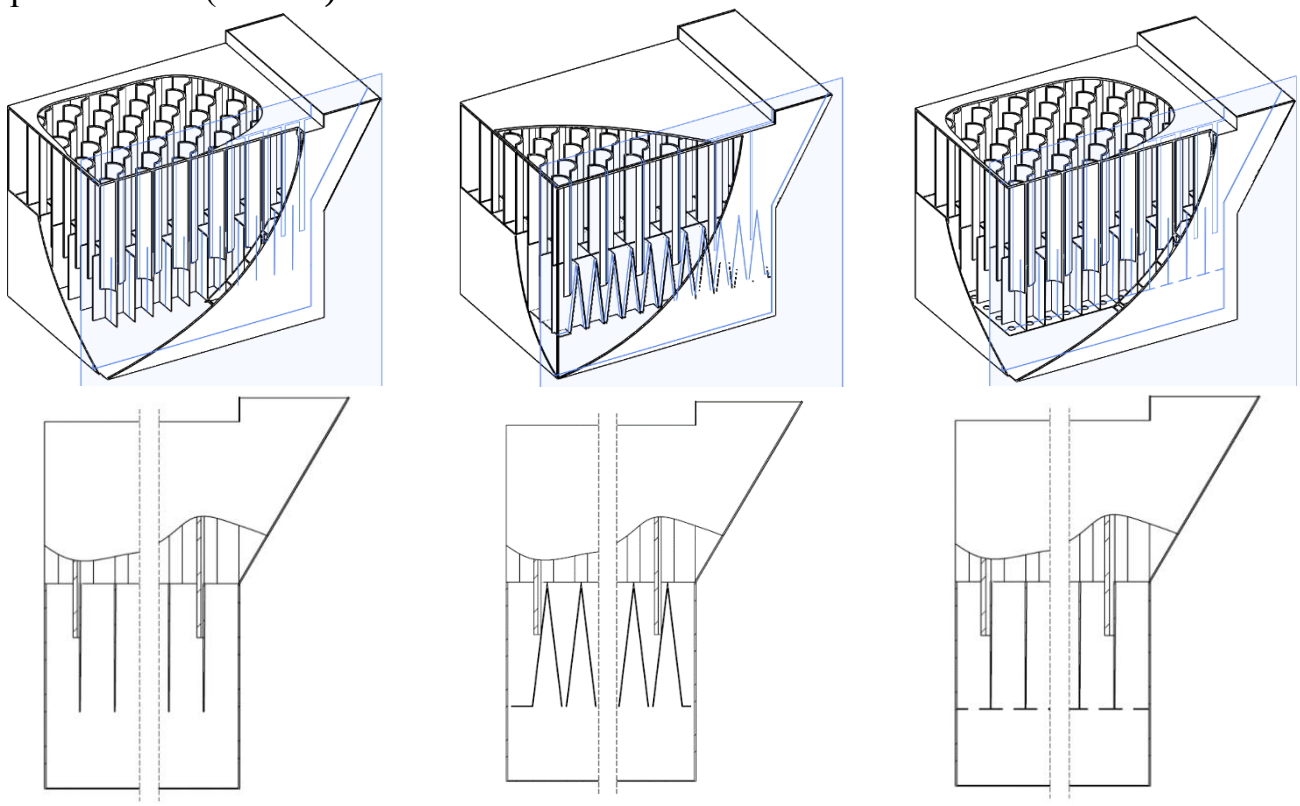
Принцип действия сепарационного устройства (рис. 1, *а*) заключается в создании структурированного волнообразного газового потока при огибании им дугообразных элементов, расположенных в шахматном порядке (рис. 1, *б*). Газ с частицами катализатора входит в устройство через входной патрубок *1*. Диаметр элементов *2* относительно небольшой, равный до 60 мм. В результате под действием центробежных и инерционных сил, действующих на твердые частицы в потоке, они выбиваются из него и перемещаются к дугообразным элементам *2*. После контакта с которыми частицы отражаются от них и попадают, как правило, в застойные зоны с околонулевыми скоростями газового потока, которые располагаются внутри дугообразных элементов и непосредственно за ними. Далее частицы оседают в бункере сепарационного устройства *7*. Очищенный газ выходит через выходной патрубок *8*.

Сепарационная решетка *4* в нижней части устройства, представляющая собой продольные *5* и поперечные *V* – образные *6* пластины, предусмотрена для снижения проскока газа под ней и дугообразными элементами, который способен подхватывать частицы катализатора и возвращать их в основной поток. При этом элементы *2* вставляются в продольные пластины *5*, выполняющие роль ребер жесткости.

В ходе численных исследований было рассмотрено 3 вида сепарационных решеток, представленных на рисунке 2. Их исследование показало, что эффективность сепарационного устройства в среднем составляет 88,6, 88,5 и 65,6 %

при конструктивном варианте сепарационной решетки *а*, *б* и *в* (рис. 2) соответственно (рис. 3). Наилучшим конструктивным решением является сепарационная решетка с *V* - образными пластинами.

Натурные исследования проводились на экспериментальной установке (рис. 4). Проведение экспериментальных исследований состояло из серии опытов (табл. 1).



а) *б*) *в*)

Рисунок 2 – Схемы сепарационных решеток (продольный разрез): *а)* – сотовая из продольных и поперечных пластин; *б)* – из продольных и поперечных *V*-образных пластин; *в)* – из продольных и поперечных пластин с перфорированным дном

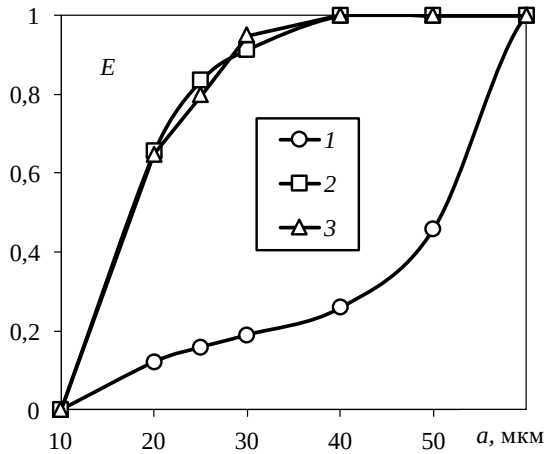
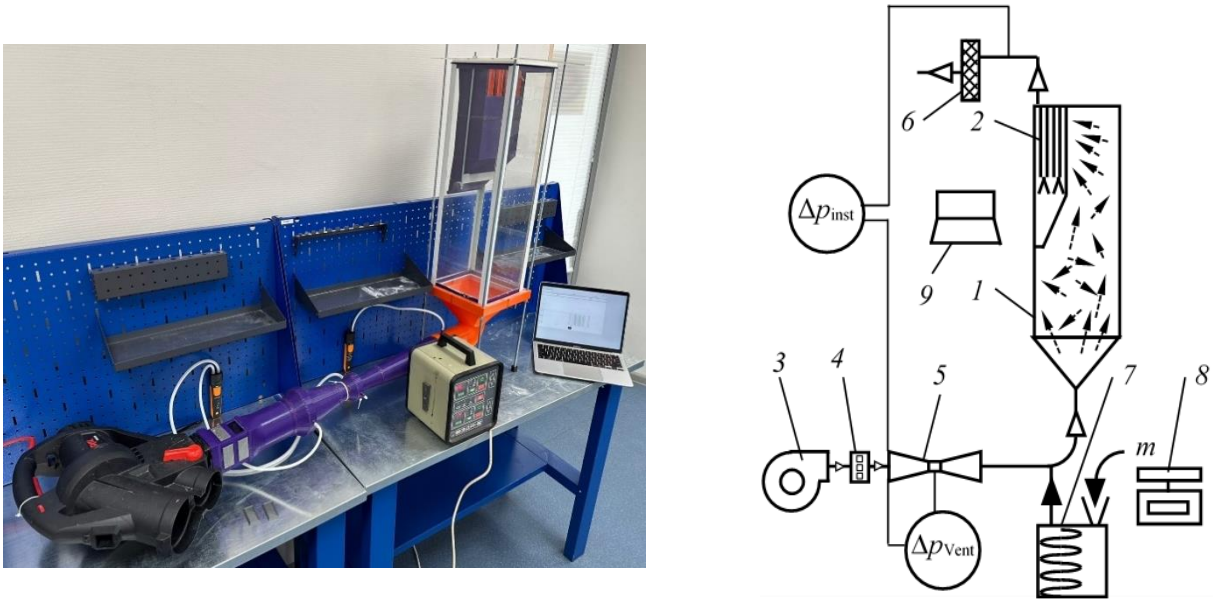


Рисунок 3 – Зависимости эффективности улавливания твердых частиц сепарационным устройством с дугообразными элементами от диаметра частиц: *1* – сотовая из продольных и поперечных пластин; *2* – из продольных и поперечных *V*-образных пластин; *3* – из продольных и поперечных пластин с перфорированным дном

При применении сепарационной решетки с *V* – образным пластинами обеспечивается эффективное ссыпание уловленных частиц в бункер относительно иных сепарационных решеток. Также практически исключаются застойные зоны, в которых может накапливаться уловленный катализатор. Необходимо отметить, что к первой и последней *V* – образным пластинам (рис. 2, *б*) привариваются пластины, образующие между ними и корпусом сепарационного устройства щели, по своей ширине равные щелям между соседними *V* – образными пластинами, что позволяет исключить проскок больших объемов газа через первую и последнюю щели.

В ходе каждого, из которых изменялась скорость движения газа в установке по средствам открытия и закрытия отверстий в ресивере *4*. Каждый опыт состоял из двух основных этапов: 1. Установление квазистационарного течения воздуха в экспериментальной установке (выход на постоянный режим), который определялся по измерению потери давления Δp_{inst} в ней (около 10 с).



а) *б*)

Рисунок 4 – Экспериментальная установка: (***а***) внешний вид; (***б***) функциональная схема: *1* – лабораторный модуль; *2* – сепарационное устройство с дугообразными элементами; *3* – вентилятор; *4* – ресивер; *5* – расходомер на базе сопла Вентури; *6* – фильтр тонкой очистки; *7* – инфузионный шприцевой насос ВЭДА-5; *8* – весы; *9* – вычислительное устройство; Δp_{Vent} – прибор для измерения перепада давлений в расходомере; Δp_{inst} – прибор для измерения потери давления в экспериментальной установке

2. Ввод катализатора ИМ – 2201 в экспериментальную установку. Введение порошка осуществлялось при ускоренной подачи инфузионным шприцевым насосом ВЭДА-5, расход которого составлял 200 мл/ч. При вводимой массе катализатора 3,75-14,42 г продолжительность его подачи составляла 40,8-259,5 с. Средняя скорость газа определялась по средствам расходомера Вентури *5*, которая была создана по ГОСТу 8.586.4-2005 ГСИ. Поверка его метрологических характеристик проводилась в Государственном региональном центре стандартизации метрологии и испытаний в Республике Татарстан (ФБУ «ЦСМ Татарстан»), которая показала, что наибольшее относительное расчетное значение расхода воздуха от заданного расхода не превысило (по модулю) ±8%.

Таблица 1 – Расчетные экспериментальные параметры воздуха и частиц катализатора ИМ-2201

Параметр	Значение					
	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Опыт 5	Опыт 6
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*
Объемный расход воздуха Q, м^3/с	0.011	0.015	0.021	0.025	0.028	0.032
Скорость воздуха на входе в расходомер на базе сопла Вентури w_{inst}, м/с	2.25	2.91	3.97	5.06	5.51	6.32

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
Скорость воздуха на входе в сепарационное устройство w, м/с	0.87	1.12	1.53	1.95	2.12	2.43
Массовый расход катализатора $G_р$, г/с	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056	0.056
Концентрация катализатора в воздухе $n_р$, г/м^3	5.09	3.73	2.67	2.24	2	1.75
Процентное содержание катализатора в воздухе $c_р$, %	0.42	0.3	0.22	0.18	0.16	0.14

Дисперсность, вводимого катализатора ИМ – 2201 в экспериментальную установку была определена с помощью электронного микроскопа. Размер частиц составлял от 1 до 208 мкм (рис. 5).

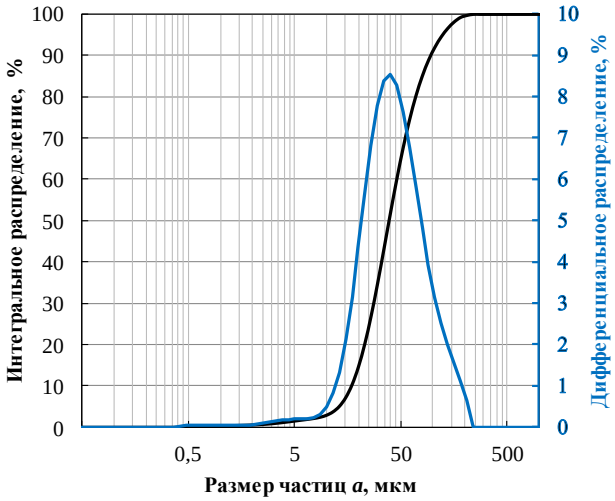


Рисунок 5 – Кривые распределения частиц катализатора по размерам

При проведении численных исследований была построена трехмерная модель экспериментальной установки (рис. 6, *а*), на основе которой была создана сеточная модель (рис. 6, *б*). в качестве модели турбулентности была выбрана модель рейнольдсовых напряжений Reynolds Stress Model (RSM). Согласно эксперименту задавались граничные условия: скорость газа (Inlet gas), расход частиц (Inlet particles) и атмосферное давление (Outlet) (рис. 6).

Исследование по сеточной независимости позволило установить, что минимальное количество полиэдрических элементов в расчетной сетке – 1 328 094 шт. Дальнейшее ее сгущение приводит к незначительному изменению потери давления Δp_{inst}, на 0,5 %.

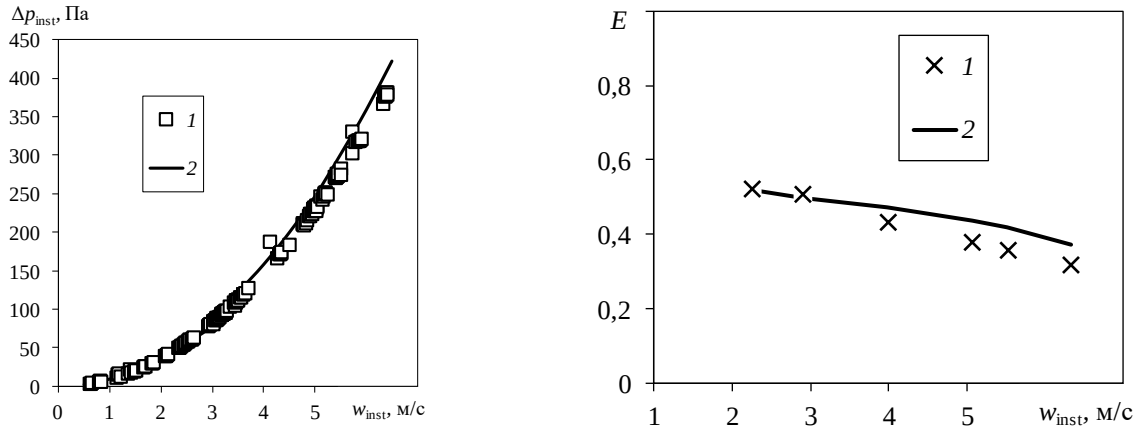
а) *б*)

Рисунок 6 – *а)* Трехмерная модель экспериментальной установки; *б)* сеточная модель

Сравнение данных, полученных путем численного моделирования с результатами экспериментальных исследований по потери давления Δp_{inst}, Па показало, что расхождение между данными составило не более 6% (рис. 7, *а*).

Расхождение между физическим экспериментом и численным моделированием составило не более 15,5% (рис. 7, *б*). Получена экспериментальная зависимость эффективности сепарационного устройства в лабораторном модуле от скорости газа на входе в установку (1):

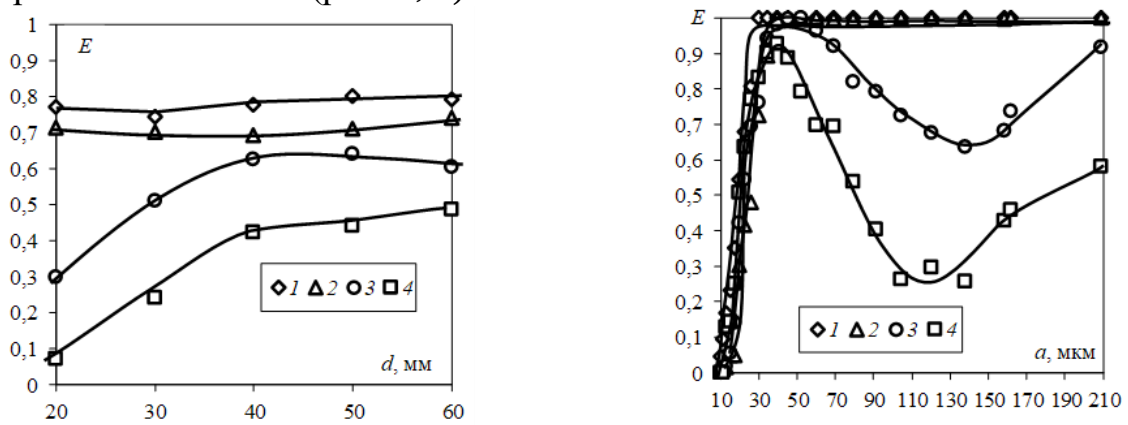
$$E = -0,05 w_{inst} + 0,65 \quad (1)$$



а) *б*)

Рисунок 7 – Зависимость потери давления Δp_{inst} (*а*) и эффективности сепарационного устройства (*б*) от скорости воздуха на входе в расходомер на базе сопла Вентури. *1* – экспериментальные данные; *2* – численное моделирование

Численное исследование сепарационного устройства показало, что при скорости менее 1 м/с эффективность увеличивается при различном диаметре дугообразных элементов (рис. 8, *а*).



а) *б*)

Рисунок 8 – *а)* Зависимость эффективности сепарационного устройства от диаметра дугообразных элементов при различной скорости газа на входе *w*, м/с: *1* – 0,5; *2* – 1; *3* – 2; *4* – 3. Рассматривалась фракция частиц от 10 до 208 мкм. Количество рядов дугообразных элементов n_1 = 8; *б)* Фракционная эффективность сепарационного устройства от размера частиц при различной скорости газа на входе *w*, м/с: *1* – 0,5; *2* – 1; *3* – 2; *4* – 3. Диаметр дугообразных элементов *d* = 40 мм

Получены зависимости (2) и (3) для определения эффективности устройства при скорости газа равной 0,5 и 1 м/с соответственно при различном количестве рядов дугообразных элементов:

$$E_{w=0,5} = 0,014n_1 + 0,67 \quad (2)$$

$$E_{w=1} = 0,017n_1 + 0,56 \quad (3)$$

С увеличением скорости снижается общая и фракционная эффективность сепарационного устройства (рис. 8, *б*).

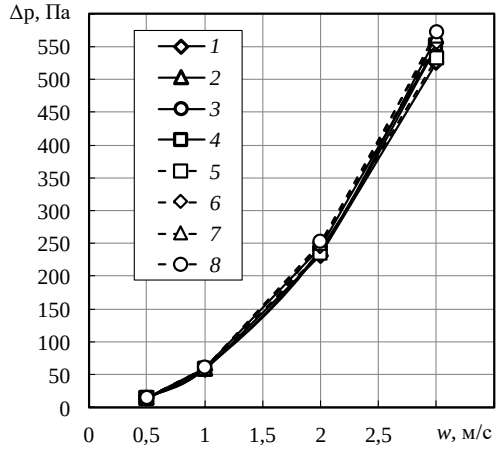


Рисунок 9 – Зависимость гидравлического сопротивления от скорости газа на входе в сепарационное устройство при различном количестве рядов элементов n_1: *1* – 5; *2* – 6; *3* – 7; *4* – 8; *5* – 9; *6* – 10; *7* – 11; *8* – 12. Диаметр дугообразных элементов *d* = 20 мм

Это вызвано повышением импульса частиц. В результате они отражаются от стенок и попадают обратно в поток. Гидравлическое сопротивление сепарационного устройства при количестве рядов дугообразных элементов от 5 до 12 шт. и скорости 0,5-3 м/с составляет не более 600 Па (рис. 9).

В главе представлен анализ фракционной эффективности устройства от размера частиц при различном диаметре элементов, которая показал, что конструктивно может быть использован любой размер из диапазона 20-60 мм при условии, что скорость на входе в сепаратор будет ниже 1 м/с, т.к. эффективность практически не изменяется. При этом потери давления составляют менее 600 Па при скорости 0,5-3 м/с на входе в устройство.

Получены зависимости (4) и (5) для определения эффективности устройства при скорости газа равной 0,5 и 1 м/с соответственно при различном диаметре дугообразных элементов:

$$E_{w=0,5} = 0,001d + 0,74 \quad (4)$$

$$E_{w=1} = 0,0007d + 0,68 \quad (5)$$

В третьей главе представлены численные исследования по эрозионному износу циклона и сепарационного устройства с дугообразными элементами.

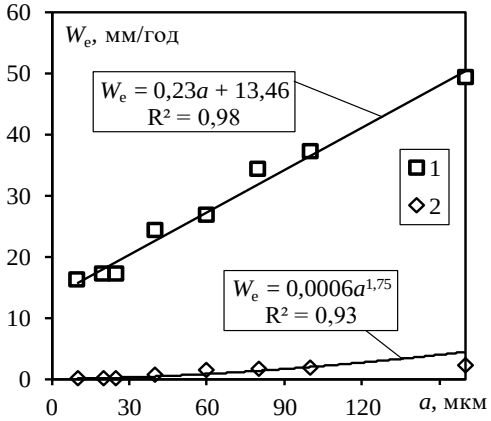


Рисунок 10 – Зависимость скорости эрозионного износа W_e, мм/год от диаметра частиц для различных аппаратов: *1* – циклон; *2* – сепарационное устройство с дугообразными элементами

Применение циклона в течение года для улавливания частиц катализатора с большой долей вероятности приведет к образованию щелей в стенках аппарата, т.к. эрозионный износ составляет более 15 мм в год. При волнообразной структуре потока в сепарационном устройстве с дугообразными элементами скорость эрозионного износа составляет не более 2,3 мм. При толщине стенок более 3 мм с большой долей вероятности обеспечивается сохранность дугообразных элементов (рис. 10).

При использовании сепарационного устройства с дугообразными элементами эрозии наиболее подвержены первые 2 ряда элементов. Это вызвано неполноценно сформировавшейся структурой запыленной среды в начале устройства.

В четвертой главе представлена инженерная методика расчета сепарационного устройства в реакторе с псевдоожиженным слоем и его технико-экономическое обоснование применения относительно циклонных сепараторов.

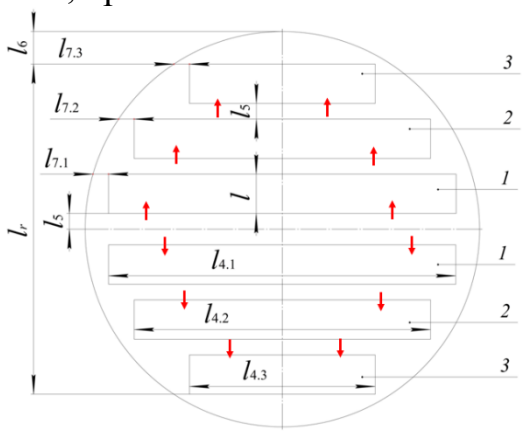
Инженерная методика позволяет рассчитать конструктивные параметры сепарационных устройств в реакторе на основе исходных зависимостей по эффективности и гидравлическому сопротивлению устройства от технологических и конструктивных параметров, полученных ранее. Проверка инженерной методики осуществляется по расчету скорости на входе в сепарационные устройства (6) и ее сравнения с эффективной скоростью, которая составляет менее 1 м/с (рис. 8, *а*).

$$w_{\text{in}} = \frac{0,5Q}{2h_{\text{in}}\sum_{i=1}^{n_3}\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - i\left(0,0669d + 1,5h_{\text{in}} + \sqrt{0,75}dn_1\right)^2} - l_{7.i}}, \qquad (6)$$

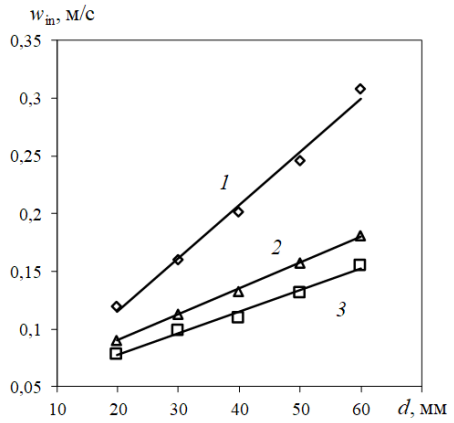
где Q – объемный расход газа в реакторе, м^3/с; h_{in} – высота входа в сепарационное устройство, м; D – диаметр реактора, м; i – порядковый номер попарно расположенных сепарационных устройств в реакторе; d – диаметр элементов; n_1 – количество рядов дугообразных элементов в сепарационном устройстве; $l_{7.i}$ – расстояние между боковой стенкой устройства и стенкой реактора, м.

Для замены циклонов сепарационными устройствами в реакторе предлагается схема их конструктивного расположения, представленная на рисунке 11, *а*. Проведенный расчет конструктивных параметров по инженерной методике показал, что при диаметре дугообразных элементов от 20 до 60 мм достигается требуемая скорость газа на входе в сепарационные устройства, составляющая менее 1 м/с (рис. 11, *б*).

Большинство технических характеристик 6 сепарационных устройств лучше, чем у 12 циклонных сепараторов: металлоемкость 5119 кг (в 1,4 раза ниже), гидравлическое сопротивление около 3600 Па (в 2,5 раза ниже), износ катализатора и стенок аппарата ниже вследствие более низких рабочих скоростей. Стоимость ниже в 2,6 раза.



а)



б)

Рисунок 11 – *а)* Размещение сепарационных устройств в реакторе (вид сверху); *б)* изменение входной скорости в сепарационные устройства при диаметре дугообразных элементов и высоте входного отверстия h_{in}, мм: *1* – 100; *2* – 200; *3* – 300; n_1 = 12

Совокупность затрат на создание и внедрение 6 сепарационных устройств с дугообразными элементами составляет 5726 тыс. руб. Индекс доходности проекта PI составил 2,5. Дисконтированный срок окупаемости составляет примерно 2,5 года.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе анализа недостатков существующих аппаратов, предназначенных для улавливания твердых частиц в реакторах с псевдоожиженным слоем была разработана конструкция сепарационного устройства, позволяющая снизить энергетические затраты, увеличить общую эффективность, повысить эрозионную стойкость и обеспечить удобство его эксплуатации и ремонта.

2. Экспериментально получено, что эффективность сепарационного устройства снижается от 52 до 31 %, при увеличении скорости газа на входе в установку от 2,2 до 6,3 м/с (при этом скорость на входе в сепарационное устройство изменяется от 0,8 до 2,4 м/с), гидравлическое сопротивление повышается от 3 до 379 Па при скорости газа на входе в установку от 0,6 до 6,3 м/с.

3. При численном моделировании установлено, что при скорости газа на входе в сепарационное устройство до 1 м/с его эффективность выше 90 % при размере частиц катализатора более 30 мкм, количестве рядов дугообразных элементов от 7 до 12 шт. и диаметре элементов от 20 до 60 мм. Увеличение скорости газа приводит к снижению эффективности, т.к. импульс частиц повышается, в результате они отражаются от элементов обратно в несущий поток.

4. Получено уравнение, позволяющее рассчитать эрозионный износ сепарационного устройства с дугообразными элементами в зависимости от размера частиц катализатора в потоке. Показано, что скорость эрозионного износа наиболее подверженных контакту с частицами поверхностей циклона составляет более 15 мм в год, скорость эрозионного износа сепарационного устройства составляет не более 2,3 мм в год.

5. Разработана инженерная методика расчета сепарационного устройства в реакторах с псевдоожиженным слоем. Получено, что при диаметре дугообразных элементов от 20 до 60 мм достигается требуемая скорость газа на входе в сепарационные устройства, составляющая менее 1 м/с, при которой достигается максимальная эффективность и минимальные потери катализатора.

6. Капитальные затраты на внедрение сепарационного устройства с дугообразными элементами в реакторах с псевдоожиженным слоем составляют 5726 тыс. руб. Индекс доходности проекта PI составил 2,5. Дисконтированный срок окупаемости составляет примерно 2,5 года.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы.

Дальнейшее развитие работы связано с исследованиями, направленных на увеличение эрозионной стойкости сепарационного устройства в зависимости от технологических параметров и физических параметров частиц.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

В изданиях из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:

1. *Салахова, Э. И.* Исследование структуры газового потока в сепарационном устройстве с дугообразными элементами / Э. И. Салахова, А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров // Вестник технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 5. – С. 60-64.

2. *Салахова, Э. И.* Влияние сепарационной решетки на эффективность улавливания твердых частиц в устройстве с дугообразными элементами / Э. И. Салахова, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, А. В. Дмитриева, А. А. Абдуллина // Вестник технологического университета. – 2023. – Т. 26. – № 8. – С. 41-46.

В изданиях, включенных в международную базу цитирования SCOPUS и Web of Science:

3. Салахова, Э. И. Пылеулавливающее устройство для блоков дегидрирования парафиновых углеводородов с кипящим слоем катализатора / Э. И. Салахова, А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, И. Р. Набиуллин, И. И. Салахов // Катализ в промышленности. – 2022. – Т. 22. – № 2. – С. 57-64. - DOI 10.18412/1816-0387-2022-2-57-64.

4. Zinurov, V. E. Numerical simulation of collection efficiency in separator with inclined double-T elements / V. E. Zinurov, V. V. Kharkov, *E. I. Salakhova*, M. R. Vakhitov, M. G. Kuznetsov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – P. 042024. – DOI 10.1088/1755-1315/981/4/042024.

5. *Salakhova, E. I.* Modeling of Erosion in a Cyclone and a Novel Separator with Arc-Shaped Elements / E. I. Salakhova, V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, I. I. Salakhov // Processes. – 2023. – V. 11. - № 1. – P. 156. – DOI: 10.3390/pr11010156.

6. Zinurov, V. E. Separating device for capturing fine particles formed during operation of fluidized bed reactors / V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, A. A. Abdullina, *E. I. Salakhova*, O.S. Dmitrieva // Chemical and Petroleum Engineering. – 2023. – № 59. – P. 288-295. – DOI 10.1007/s10556-023-01241-1.

7. *Salakhova, E. I.* Numerical study of particles removal from dusty gas in separation device with straight arc-shaped elements / E. I. Salakhova, V. E. Zinurov, V. V. Kharkov, A. A. Abdullina, The Vu Pham // E3S Web of Conf. – 2023. – V. 389. – P. 02018. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338902018.

Публикации в других изданиях и материалах конференций:

8. *Салахова, Э. И.* Численное моделирование очистки газа от твердых взвешенных частиц в сепарационном устройстве с вогнутыми отражающими элементами / Э. И. Салахова, В. Э. Зинуров, В. В. Харьков, П. Е. Глухова, В. А. Лавриков, А. Н. Николаев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 8. – С. 10-14.

9. *Салахова, Э. И.* Сравнение эрозионного износа НПУ и циклона ЦН-15 / Э. И. Салахова // XXVI Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный «Дню энергетика» (г. Казань, 6-7 декабря 2022 г.) : тезисы докладов в 3 т. Т. 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2022. – С. 388-391.

10. *Салахова, Э. И.* Особенности использования циклона при очистке газовых потоков от катализаторной пыли / Э. И. Салахова, А. В. Дмитриев // Международная научно-практическая конференция «Развитие современной науки

и технологий в условиях трансформационных процессов» (г. Москва, 15 апреля 2022 г.) : сборник материалов конференции. – М. : Типография Алеф, 2022. – С. 80-82.

11. *Салахова, Э. И.* Эрозионный износ сепарационного устройства с дугообразными элементами / Э. И. Салахова, Е. А. Козеев, В. Э. Зинуров // Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения – 2023 «Энергетика и цифровая трансформация» (г. Казань, 26–28 апреля 2023 г.) : материалы конференции в 3-х томах. – Т. 2. – Казань : Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 329-332.

12. *Салахова, Э. И.* Определение потери давления в сепараторе с дугообразными элементами / Э. И. Салахова, Г. Г. Шагиева // VII Международная студенческая научная конференция «В мире научных открытий» (г. Ульяновск, 14–15 марта 2023 г.) : материалы конференции. – Ульяновск: Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, 2023. – С. 2507-2510.

13. *Салахова, Э. И.* Улавливание частиц в реакторе с псевдоожиженным слоем / Э. И. Салахова, А. А. Абдуллина, В. Э. Зинуров // Булатовские чтения. – 2023. – Т. 2. – С. 119-121.

14. Зинуров, В. Э. Применение сепарационного устройства с дугообразными элементами для улавливания абразивных частиц / В. Э. Зинуров, *Э. И. Салахова* // XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 21-27 мая 2023 г.) : тезисы докладов. – Том 2. – СПб : Санкт-Петербургский горный университет, 2023. – С. 106-107.

Патент РФ на полезную модель:

15. Пат. 219550 Российская Федерация, МПК B01D 45/08. Устройство для очистки газа от твердых взвешенных частиц / *Салахова Э. И.,* Зинуров В. Э., Дмитриев А. В., Дмитриева О. С., Абдуллина А. А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет». – № 2023114446; заявл. 01.06.2023; опубл. 24.07.2023, Бюл. № 21. – 8 с.