

На правах рукописи



Коленчуков Олег Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РЕАКТОРНЫХ
АГРЕГАТОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ
ТЕРМОКОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Специальность: 2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Белгород – 2024 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель:

Петровский Эдуард Аркадьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование нефтегазового комплекса» ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

Официальные оппоненты:

Евсеев Алексей Владимирович, доктор технических наук, доцент кафедры «Промышленная автоматика и робототехника» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Егоров Алексей Васильевич, доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе и инновациям ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина»

Защита состоится «28» марта 2024 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.276.03 на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46, ауд. Гк 214.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» и на сайте (URL: https://gos_att.bstu.ru/dis/Kolenchukov)

Автореферат размещен на сайте ВАК при Министерстве образования и науки РФ

Автореферат диссертации разослали « » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



И. А. Семикопенко
к.т.н., доцент

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современный этап развития машиностроительной промышленности характеризуется тенденцией, направленной на решение задач повышения качества и производительности в виде энергоэффективности энерготехнологического оборудования с одновременным снижением выбросов вредных веществ в окружающую среду. Ежегодное возрастание номенклатуры машин в результате расширения технологических процессов приводит к образованию большого количества органических отходов (бытовых, биологических, промышленных, например, нефтяных или строительных и др.), требующих их дальнейшей утилизации. В настоящее время одним из перспективных методов утилизации данных отходов является применение реакторных агрегатов, позволяющих в результате переработки получать ценные продукты для различных отраслей промышленности.

На сегодняшний день используются разнообразные реакторы, принцип действия которых основан на физических, химических и других видах воздействия на исходное сырье. Среди данных агрегатов наибольшее применение получили реакторы, функционирующие на термохимических принципах действия (около 80 %). Основным направлением в разработке реакторных агрегатов является повышение производительности реакторных технологических систем. Для повышения производительности технологических процессов и обеспечения интенсификации теплообмена реакторных агрегатов используют различные способы формирования термоконтактных поверхностей. Описанные выше эффекты при применении термоконтактных поверхностей достигаются за счет увеличения площади теплообмена, а также за счет создания завихрений потока теплоносителя и более раннего его перехода из ламинарного течения в турбулентное. С точки зрения химических процессов наиболее интенсивный теплообмен позволяет минимизировать количество вторичных реакций при переработке органических отходов, делая получаемое сырье более качественным.

Большинство применяемых реакторных агрегатов в технологических системах имеют одноэлементный корпус с технологическим обеспечением или без технологического обеспечения геометрии на внутренней поверхности. С целью обеспечения ремонтпригодности как важнейшего показателя надежности и снижения затрат на эксплуатацию агрегата необходимо сохранять дорогостоящий и металлоёмкий корпус агрегата. Для защиты основного корпуса от термических, химических и других повреждений целесообразно формировать термоконтактную поверхность в двухэлементном корпусе, второй элемент которого при этом должен быть выполнен в виде листовой обечайки. В случае выхода из строя обечайки, выполненной по двухэлементной технологии, потребуется разборка

реакторного агрегата с последующими технологическими операциями разделения корпуса.

На основании вышесказанного задача разработки технологии изготовления двухэлементного корпуса реакторных агрегатов технологических систем с термоконтактной поверхностью является актуальной. При этом задача разработки технологического процесса формирования термоконтактной поверхности на тонколистовом материале для повышения производительности и надежности реакторного агрегата также представляет практический интерес.

Степень разработанности темы исследования. Основополагающие исследования по разработке и модернизации конструкций утилизирующих реакторных агрегатов и технологий переработки органических отходов в нашей стране выполнены Р.Р. Шангареевым, А.Г. Копачевым, А.В. Медведевым, В.А. Глушковым, С.А. Прокопьевым, Е.И. Бахониной, Ю.Ю. Косивцевым, А.Г. Сафиулиной, И.Х. Мустафиным, А.Н. Расстегаевым, Э.А. Петровским и др. За рубежом основные исследования в области обращения с органическими отходами активно ведутся в Китае, США, Японии, Турции, Испании и Саудовской Аравии. В настоящее время значимый вклад в изучение процесса термической деструкции и развитие реакторного оборудования для переработки органических отходов внесли следующие ученые: S. Cheng, Y. Wang, J.L. Klinger, T.L. Westover, M.S. Abbas-Abadi, C. Barbiero, R.S.R.M. Hafriz и др.

В связи с ежегодным возрастанием спроса на утилизирующие реакторные агрегаты из-за образования большого количества органических отходов, необходимо предложить техническое решение, которое сможет повысить производительность и эффективность их работы. При этом данное техническое решение должно быть экономичным и надежным.

Объект исследования – утилизирующие реакторные агрегаты термической деструкции.

Предмет исследования – совершенствование технологических процессов термической деструкции органических отходов в реакторных агрегатах со сфероидальными выступами на внутренней поверхности.

Цель работы. Повышение производительности технологических процессов термической деструкции органических отходов на основе формирования сфероидальных выступов на внутренней термоконтактной поверхности реакторного агрегата.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи исследования:**

- классифицировать существующие реакторные агрегаты по конструктивно-технологическим признакам и провести обзор технологий изготовления интенсифицирующих устройств технологических реакторов;

- разработать технологию изготовления и сборки двухэлементного корпуса реакторного агрегата в виде комбинированного теплообменного элемента с термоконтakтной поверхностью;

- провести имитационное математическое моделирование в программном комплексе COMSOL Multiphysics реакторного агрегата с модифицированной термоконтakтной поверхностью и оценку ее влияния на теплообмен;

- разработать оптимизационную математическую модель, учитывающую влияние параметров макрогеометрии на теплообменные процессы;

- провести экспериментальное исследование технологических режимов формообразования и апробацию выражения для расчета усилия формообразования, а также определить технологические параметры клеевого соединения при сборке двухэлементного корпуса реакторного агрегата;

- определить влияние модифицированной термоконтakтной поверхности на выход продуктов термической деструкции на основе натуральных экспериментов;

- разработать рекомендации по изготовлению двухэлементного корпуса в виде комбинированного теплообменного элемента и определить возможности его одновременного применения с иными устройствами интенсификации теплообменных процессов.

Научная новизна:

- создана методология повышения производительности реакторных агрегатов, основанная на применении регулярной термоконтakтной поверхности со сфероидальными выступами;

- исследовано повышение качества теплообменных процессов реакторных агрегатов на основе геометрического модифицирования термоконтakтной поверхности;

- получена математическая оптимизационная модель конструктивно-технологических и режимных параметров реакторных агрегатов, позволяющая в производственных условиях при их ремонте и совершенствовании управлять производительностью;

- экспериментально изучены возможности повышения производительности реакторных агрегатов на основе применения термоконтakтных поверхностей со сфероидальными выступами и получено математическое выражение для определения технологических режимов их образования.

Теоретическая значимость. Теоретическая значимость работы заключается в разработке математической модели, учитывающей влияние изменения конструктивно-технологических и режимных параметров реакторного агрегата, а также в установлении математического выражения для определения усилия при образовании термоконтakтной поверхности со сфероидальными выступами на листовом металле.

Практическая значимость:

– разработана и внедрена технология изготовления двухэлементного корпуса реакторного агрегата в виде комбинированного теплообменного элемента, инструмент для осуществления которой представляет собой многофункциональный барабан (патент на изобретение РФ № 2759309);

– разработаны реакторные установки для получения углеводородных газов из органических отходов (патент на изобретение РФ № 2677184) и получения водорода и водородсодержащих смесей из углеводородных газов (патент на изобретение РФ № 2789519), содержащие устройства интенсификации теплообмена;

– установлены оптимальные режимные параметры образования термоконтактной поверхности, определены оптимальные параметры толщины клеевого соединения и параметры состояния поверхностного слоя;

– проведены испытания термической деструкции отходов нефтяных месторождений Красноярского края на разработанном реакторном агрегате с двухэлементным корпусом в составе технологической установки;

– проанализированы и обобщены технологические данные по изготовлению, сборке и применению двухэлементного корпуса в виде комбинированного теплообменного элемента для обеспечения высокого качества производственных процессов.

Методы исследований. В диссертационной работе использовались теоретические (метод идеализации, метод формализации), экспериментальные (метод наблюдения, эксперимент, метод сравнения) и специальные (математическое и физическое моделирование) методы исследований.

Основные положения, выносимые на защиту:

– классификация реакторных агрегатов и технологий формирования термоконтактных поверхностей;

– способ и устройство для изготовления двухэлементного корпуса реакторного агрегата в виде комбинированного теплообменного элемента;

– результаты теоретических и экспериментальных исследований, определяющие режимные параметры формирования термоконтактной поверхности и показывающие влияние качества поверхности при сборке двухэлементного корпуса реакторного агрегата;

– математическая модель, учитывающая влияние параметров макрогеометрии, а также оптимизационная модель конструктивно-технологических и режимных параметров реакторных агрегатов;

– результаты экспериментальных исследований термической деструкции нефтяных отходов месторождений Красноярского края, полученные при использовании реакторного агрегата с двухэлементным корпусом в составе разработанной технологической установки;

– способ нанесения клеевой композиции с помощью ее накатывания прижимными роликами, способы фиксации замка для закрепления термоконтактной поверхности.

Достоверность полученных результатов обеспечивается за счет использования точного измерительного и технологического оборудования, применения современного программного обеспечения для имитационного моделирования, применения аттестационных методик исследований, использования многочисленных экспериментальных данных, а также сравнения полученных экспериментальных результатов с теоретическими.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационного исследования были доложены на следующих конференциях: III Международной Российско-Казахстанской научно-практической конференции «Химические технологии функциональных материалов» (г. Новосибирск, 2017 г.); IX Международной научной конференции «Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы в производстве» (г. Казань, 2019 г.); III Международной научно-практической конференции «Избранные вопросы науки XXI века» (г. Москва, 2019 г.); XI Международной научной конференции «Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности» (г. Волгоград, 2021 г.); VI Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов» (г. Москва, 2021 г.); XVIII Международной конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектива – 2022» (г. Красноярск, 2022 г.).

Основные результаты исследований используются при обучении студентов в рамках дисциплины «Проектирование машин и аппаратов нефтегазопереработки», а также для получения биотопливных композиций в лаборатории Сибирского федерального университета (контракт FSRZ-2021-0012). Часть исследований выполнена при поддержке стипендии Президента РФ (СП-3129.2019.1). Результаты исследований отмечены государственными наградами Губернатора Красноярского края и Главы города Красноярска в 2020 и 2021 годах.

Публикации. По результатам представленных исследований опубликованы 23 работы, из них – 6 публикаций в научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 5 публикаций в журналах, входящих в базы данных Scopus, 5 тезисов докладов и статей в сборниках международных конференций, 5 патентов РФ на изобретение, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 монография.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы и одного приложения. Материалы диссертационного исследования изложены на 178 страницах, содержат 15 таблиц, 91 рисунок, 68 формул. Список используемой литературы содержит 201 источник.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, представлены цель и задачи, сформулированы научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации изложены классификация и анализ видов конструкций утилизирующих реакторных агрегатов, а также анализ технологий изготовления термоконтактных поверхностей с определением их преимуществ и недостатков.

В результате проведенного анализа установлено, что общими тенденциями развития утилизирующих реакторных агрегатов на сегодняшний день являются:

1. Стремление увеличить их эффективность и производительность путем вовлечения в процесс приспособлений, позволяющих интенсифицировать тепломасообменные процессы (перемешивающие устройства, термоконтактные поверхности, различные системы нагрева и др.).
2. Использование конечных продуктов в качестве вторичных материальных ресурсов (в качестве топлива, химического сырья и реагентов, строительных добавок и т.д.) с одновременным уменьшением вредных выбросов в окружающую среду при их изготовлении.

Рассмотрение конструктивных особенностей реакторных агрегатов позволило установить основные их недостатки, к которым в общем случае относятся высокие материальные и/или энергетические затраты, ввиду чего работа данных агрегатов в настоящее время является нестабильной.

Как отмечают многие исследователи, наиболее рациональным способом повышения эффективности и производительности реакторных агрегатов является использование в их составе пассивных устройств термодинамического воздействия (турбулизирующие вставки, дискретно-шероховатые, или термоконтактные, поверхности и др.). Применение данных устройств позволяет интенсифицировать теплообмен между реагирующими средами без использования дополнительного оборудования (приводов, электродвигателей, перемешивающих устройств и др.) и снизить энергетические затраты. Местонахождение устройств пассивной интенсификации можно продемонстрировать на примере реакторного агрегата типа «труба в трубе» (рисунок 1). Расположение их в канале с теплоносителем позволит интенсифицировать процесс теплообмена за счет увеличения контактной площади и турбулизации потока.

Анализ технологий изготовления интенсифицирующих устройств показывает, что турбулизирующие вставки и термоконтактные поверхности являются наиболее востребованными, так как способы их изготовления хорошо отработаны. Тем не менее существует ряд недостатков, не позволяющих использовать данные устройства повсеместно. Так,

изготовление турбулизирующих вставок характеризуется большой металлоемкостью, что является затруднительным при использовании их в реакторных агрегатах с каналом (внутренним корпусом) большого диаметра. В свою очередь, существующие технологии формирования термоконтактных поверхностей трудно применимы к каналам большого диаметра и толщины, а также к каналам сложной формы. Ввиду этого является важным создание технологии модификации корпуса реакторных агрегатов, позволяющих устранить данные недостатки.

На основании всего вышесказанного была сформулирована цель диссертационного исследования и определены задачи для достижения поставленной цели.

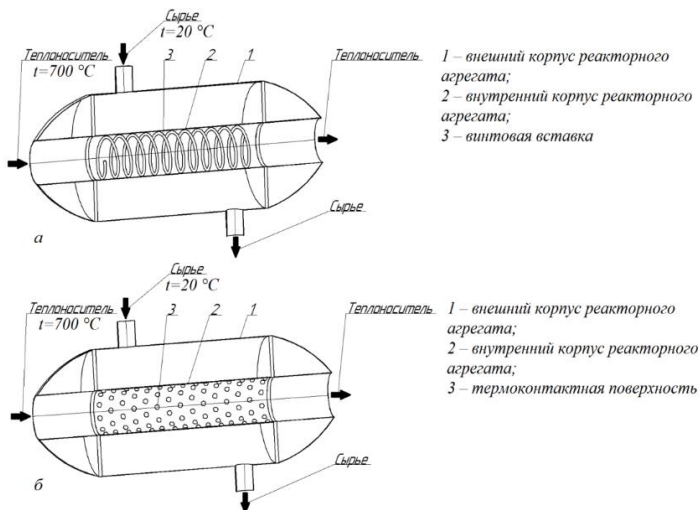


Рисунок 1 – Реакторные агрегаты с интенсификаторами теплообмена:

а – агрегат с модификацией в виде винтовой вставки; б – агрегат с модификацией в виде термоконтактной поверхности с выступами

Во второй главе диссертации обоснована необходимость модификации корпуса реакторного агрегата, представлена разработанная технология и устройство для изготовления двухэлементного корпуса реакторного агрегата в виде комбинированного теплообменного элемента. Определено влияние геометрических параметров термоконтактных элементов (выступов) на теплообмен в реакторе термической деструкции при переработке жидких органических отходов. Проведен регрессионный анализ и представлена оптимизационная модель, позволяющая определить оптимальные конструктивно-технологические и режимные параметры реакторных агрегатов в двухэлементном корпусе в виде комбинированного

теплообменного элемента с термоконтakтной поверхностью. Представлено выражение для определения величины прогиба пластины, необходимое для формирования термоконтakтной поверхности. Проведен анализ влияния параметров состояния поверхностного слоя при сборке двухэлементного корпуса реакторного агрегата посредством склеивания.

Интенсификация тепломассообменных процессов является актуальной задачей при получении углеводородных газов. При этом чистота получаемого углеводородного газа напрямую влияет на качество продуктов при дальнейшем его использовании. При разрыве связей С–С образуются радикалы, которые взаимодействуют с молекулой углеводорода большего размера. В результате данной реакции появляется новый алифатический радикал. При этом возникают и вторичные реакции β -распада, а образующийся при этом радикал может вступать в новые реакции и являться источником зарождения новых цепей. Однако вторичные реакции приводят к образованию веществ, загрязняющих образующиеся углеводородные газы. С целью уменьшения данного эффекта возможно использование

интенсифицирующих устройств в виде сборной конструкции, представляющей собой комбинированный теплообменный элемент, состоящий из термоконтakтной поверхности, клеевой композиции и корпуса реакторного агрегата. При этом выступы термоконтakтной поверхности целесообразно образовывать с помощью разработанного формообразующего инструмента, согласно разработанной технологии (рисунок 2). Образование выступов по данной технологии позволяет уменьшить искажение формы получаемой термоконтakтной поверхности, а также уменьшить усилие, необходимое для их формирования. Предлагаемая технология формирования термоконтakтной поверхности с полусферическими выступами состоит из следующих трех этапов:

1. Формирование выступов термоконтakтной поверхности посредством пластического деформирования.

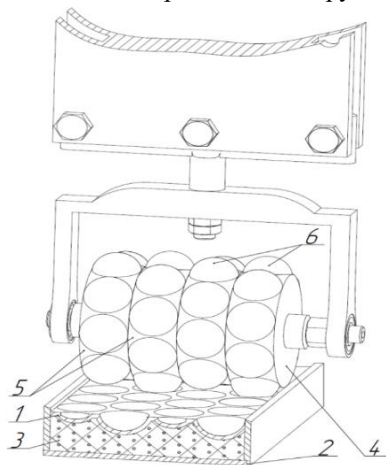


Рисунок 2 – Образование термоконтakтной поверхности с полусферическими выступами методом пластического деформирования: 1 – металлический лист; 2 – лоток; 3 – упругое основание; 4 – комбинированный барабан; 5 – секции барабана; 6 – профильные плашки

2. Придание термоконтактной поверхности с выступами формы обечайки, повторяющей форму внутреннего корпуса реакторного агрегата.

3. Формирование шероховатости на сопрягаемых поверхностях (термоконтактная поверхность и внутренний корпус) и фиксация внутри корпуса реакторного агрегата.

Оценка влияния применения термоконтактной поверхности с термоконтактными элементами (выступами) полусферической формы в составе комбинированного теплообменного элемента двухэлементного корпуса реакторного агрегата термической деструкции проводилась в программном комплексе COMSOL Multiphysics 5.5. Исходные модели были подготовлены в САПР SolidWorks (рисунок 3). При моделировании регулировались следующие параметры, влияющие на процесс теплообмена: v – скорость теплоносителя, м/с; h – высота выступов, мм; t – шаг вдоль образующей канала, мм; k – шаг вдоль направляющей канала, мм. Эквивалентный диаметр для каналов с теплоносителем принимал следующие значения: без выступов – $d_{\text{эк}} = 31$ мм, с выступами 1 мм – $d_{\text{эк}} = 30,51$ мм, с выступами 2 мм – $d_{\text{эк}} = 30,2$ мм, с выступами 3 мм – $d_{\text{эк}} = 29,35$ мм, с выступами 4 мм – $d_{\text{эк}} = 27,78$ мм. В качестве исходного продукта использовалось отработанное масло (органические отходы), в качестве теплоносителя – продукты сгорания углеводородных газов. Температура теплоносителя принималась равной 700 °С. Эквивалентный диаметр рассчитывался с помощью следующего выражения:

$$d_{\text{эк}} = \left(\frac{4V}{\pi L} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

где V – внутренний объем трубы (канала), по которому движется среда, м³; L – длина трубы (канала), м.

Компоненты скорости и температуры неизотермического сжимаемого потока газа–теплоносителя в канале реактора термической деструкции находились с использованием стандартных уравнений, заложенных в COMSOL Multiphysics. Для этого необходимо решить усредненные уравнения переноса RANS с принятой моделью турбулентности с вихревой вязкостью. При этом уравнения сохранения массы, сохранения импульса, а также уравнение преобразования энергии для охлаждающей жидкости примут следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla u = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + F, \quad (3)$$

$$\tau = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I, \quad (4)$$

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q, \quad (5)$$

$$q = -k_f \nabla T, \quad (6)$$

где ρ – плотность, кг/м³; $u = [u_x, u_y, u_z]$ – вектор скорости в глобальных координатах; p – давление, Па; τ – вязкое напряжение, МПа; $F = [0, -g, 0]$ – вектор объемной силы; μ – динамическая вязкость, Па·с; I – единичный тензор; C_p – удельная теплоемкость, Дж/кг·К; T – абсолютная температура, К; q – вектор кондуктивного теплового потока, Вт/м²; Q – источники тепла, Вт/м³; k_f – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К.

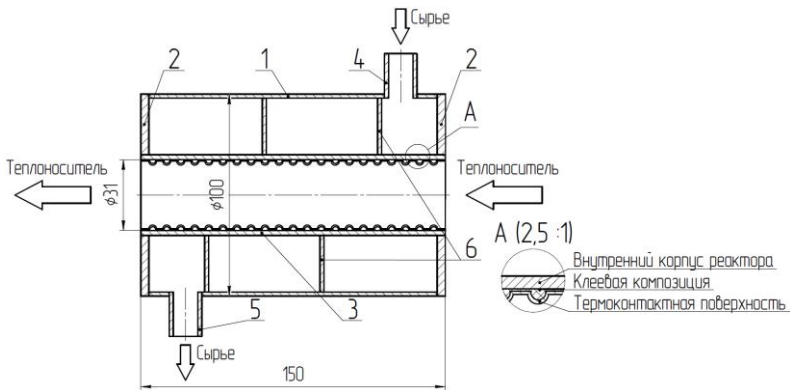


Рисунок 3 – Схема реактора для имитационного моделирования:

- 1 – внешний корпус; 2 – крышки; 3 – двухэлементный внутренний корпус;
4, 5 – входной и выходной патрубки для исходного сырья; 6 – перегородки

Результаты имитационного моделирования для удобства представлены в виде отношений шага между выступами к высоте выступов t/h , а также высоты выступов к диаметру канала $h/d_{\text{эк}}$. Кроме этого, полученные результаты сравнивались с известными в теплотехнике критериальными уравнениями для каналов с выступами с целью ориентировочного анализа эффективности теплоотдачи при применении термоконтактной поверхности в виде комбинированного теплообменного элемента. Проведенные экспериментальные исследования показывают, что использование реакторного агрегата в двухэлементном корпусе в виде комбинированного теплообменного элемента с термоконтактной поверхностью приводит к увеличению теплопроводности. Увеличение высоты выступов h и скорости течения теплоносителя v способствует повышению средней температуры в реакторе. Уменьшение отношения t/h и увеличение отношения $h/d_{\text{эк}}$ также

приводят к увеличению средней температуры в реакторе, в частности, из-за влияния параметра h . Немаловажное значение имеет шаг вдоль направляющей канала k . Его уменьшение также способствует повышению средней температуры в реакторе (таблица 1). Повышение средней температуры в реакционной зоне реактора происходит из-за образования завихрений, а также более развитой контактной площади.

Таблица 1 – Результаты исследования эффективности применения термоконтактной поверхности при различных параметрах

Высота полусферических выступов	Увеличение средней температуры реакционной камеры реактора, %
Цилиндрический гладкий канал	–
Цилиндрический канал с выступами 1 мм	2,3–4,7 (при $t/h = 20$, $h/d_{\text{эк}} = 0,033$, $k = 5,7$) 1,3–3,3 (при $t/h = 20$, $h/d_{\text{эк}} = 0,033$, $k = 9,7$) 0,2–1,0 (при $t/h = 20$, $h/d_{\text{эк}} = 0,033$, $k = 16,2$)
Цилиндрический канал с выступами 2 мм	4,1–9,4 (при $t/h = 10$, $h/d_{\text{эк}} = 0,066$, $k = 5,7$) 3,2–7,9 (при $t/h = 10$, $h/d_{\text{эк}} = 0,066$, $k = 9,7$) 2,0–5,5 (при $t/h = 10$, $h/d_{\text{эк}} = 0,066$, $k = 16,2$)
Цилиндрический канал с выступами 3 мм	5,4–11,9 (при $t/h = 6,67$, $h/d_{\text{эк}} = 0,102$, $k = 5,7$) 4,4–10,4 (при $t/h = 6,67$, $h/d_{\text{эк}} = 0,102$, $k = 9,7$) 3,3–7,9 (при $t/h = 6,67$, $h/d_{\text{эк}} = 0,102$, $k = 16,2$)
Цилиндрический канал с выступами 4 мм	4,8–11,5 (при $t/h = 5$, $h/d_{\text{эк}} = 0,144$, $k = 9,7$) – –

С целью установления взаимосвязей конструктивно-технологических и режимных параметров реакторного агрегата с термоконтактной поверхностью и оптимизации процесса термической деструкции углеводородных отходов использовался программный пакет Statistica 10 и регрессия по поверхности отклика. В качестве исходных данных использовались скорость течения теплоносителя v , расстояние вдоль направляющей канала k и отношение шага выступов к высоте выступов t/h , в качестве выходного параметра – температура в реакторе T . Полученное уравнение регрессии (7) исследуемой модели в раскодированном виде и без учета незначимых коэффициентов выражает зависимость выходного параметра от входных, а коэффициенты уравнения показывают количественное воздействие каждого фактора на результативный показатель при неизменности других. Погрешность результатов, получаемых с помощью данного уравнения регрессии, по сравнению с результатами имитационного моделирования составляет 0,05–1,01 %.

$$y(T) = 563,911 + 48,398v - 2,476k - 5,45t/h + 0,167vk + 0,309vt/h - 5,432v^2 + 0,094(t/h)^2, \quad (7)$$

где v – скорость течения теплоносителя, м/с; k – расстояние вдоль направляющей, мм; t/h – отношение шага вдоль образующей t к высоте выступов h .

В качестве инструмента, используемого для оптимизации конструктивно-технологических и режимных параметров реакторного агрегата, использовалось построение профилей желательности (рисунок 4). В результате построения получаем, что для скорости течения теплоносителя наиболее оптимальным значением является $v = 3$ м/с. Расстояние вдоль направляющей должно составлять $k = 10,533$ мм, а отношение расстояния между выступами вдоль образующей к высоте выступов $t/h = 12,223$ мм.

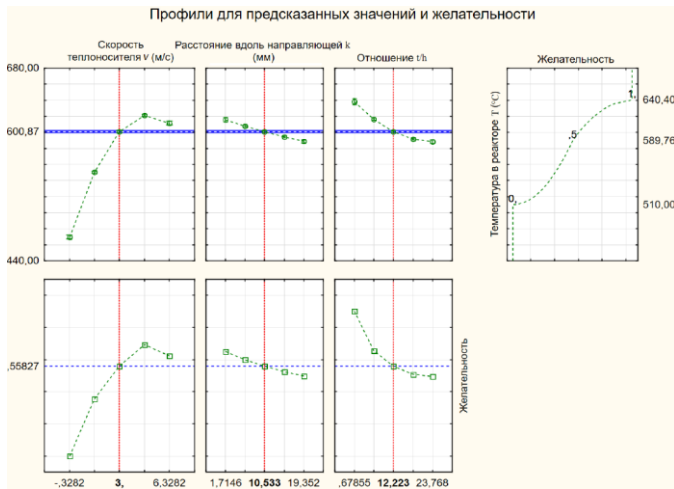


Рисунок 4 – Профили желательности

В третьей главе диссертации представлены экспериментальные исследования по формированию термоконтактной поверхности с полусферическими выступами на листовом материале с помощью полученного уравнения для расчета усилия формообразования. Определена оптимальная толщина клеевого соединения, а также показано влияние состояния поверхностного слоя при сборке двухэлементного корпуса реакторного агрегата. Проведены исследования по определению производительности реакторного агрегата с использованием комбинированного теплообменного элемента (двухэлементный корпус) в процессе термической деструкции нефтяных отходов месторождений Красноярского края на разработанном экспериментальном стенде.

Исследование производительности реакторного агрегата пиролиза в двухэлементном корпусе в виде комбинированного теплообменного элемента с термоконтальной поверхностью с полусферическими выступами высотой 2 мм проводилось на экспериментальном стенде термической деструкции углеводородных отходов (рисунок 5). В качестве исходного сырья использовались нефтяные отходы, органическая часть которых была получена на месторождениях Красноярского края. В качестве теплоносителя применялся газ N_2 . Отсчет времени пребывания сырья осуществлялся после выхода реактора на рабочую температуру ($500\text{ }^{\circ}\text{C}$). При этом вначале реакционная камера реактора прогревалась до максимально возможной при заданных условиях температуры $\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ с дальнейшим ее снижением и поддержанием на уровне $500 \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление, близкое к атмосферному ($\sim 0,1$ МПа). Температура теплоносителя составляла порядка $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Увеличение температуры теплоносителя с 700 до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ сопряжено с погрешностью результатов (их завышение), полученных при имитационном моделировании. Скорость теплоносителя поддерживалась в пределах 3 м/с . Отбор проб осуществлялся каждые 5 минут в интервале времени $5\text{--}40$ минут. Сравнение результатов производилось с результатами термической деструкции в реакторе с одноэлементным корпусом без модифицирования термоконтальной поверхности.

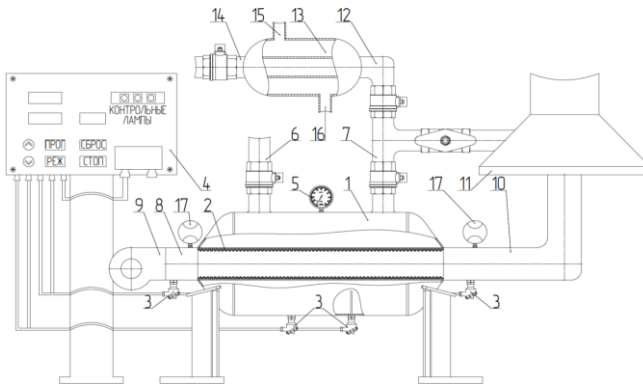


Рисунок 5 – Технологическая схема экспериментальной установки:

- 1 – реакторный агрегат пиролиза; 2 – комбинированный теплообменный элемент с термоконтальной поверхностью с полусферическими выступами;
- 3 – термоэлектрические преобразователи; 4 – измеритель-регулятор; 5 – манометр; 6 – патрубок для загрузки исходного сырья; 7 – патрубок для выгрузки продуктов реакции; 8 – патрубок для ввода теплоносителя; 9 – газонагреватель; 10 – патрубок для вывода теплоносителя; 11 – вытяжка; 12 – входной патрубок теплообменника; 13 – теплообменник; 14 – патрубок для отбора проб; 15 – патрубок для ввода хладагента; 16 – патрубок для вывода хладагента; 17 – расходомеры

Графическое изображение термоконтактной поверхности, которая используется в ходе экспериментальных исследований, представлено на рисунке 6. В качестве материала реакторного агрегата использовалась нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т. Данная сталь также применялась для изготовления термоконтактной поверхности с полусферическими выступами. При наличии выступов высотой 2 мм эквивалентный диаметр был равен $d_{\text{выс}} = 30,3$ мм, а шаг между выступами $k = 10,8$ (при наличии 9 полноценных выступов в канале) мм, $t = 24,4$ мм.

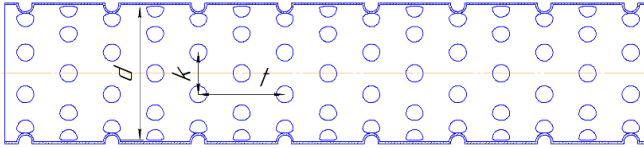


Рисунок 6 – Геометрические параметры термоконтактной поверхности с полусферическими выступами

В результате проведенных исследований установлено, что основными веществами, образуемыми в ходе реакции, являются жидкие и газообразные углеводороды. Газообразные продукты состоят преимущественно из CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_8 и C_4H_8 . Получаемые газы представляют собой наибольший интерес в качестве полезных продуктов, так как могут быть использованы как экологически чистое топливо и сырье для получения водорода. Средний суммарный выход легких углеводородов представлен в таблице 2.

Согласно данным, представленным в таблице 2, использование комбинированного теплообменного элемента способствует повышению суммарной концентрации легких углеводородов, что говорит о лучшей конверсии в ходе реакции. Кроме того, изменяется и селективность процесса. Относительная ошибка полученных результатов составляет $\pm 0,25$ %, согласно методике обработки эксперимента, представленной в ГОСТ Р 8.736–2011.

Таблица 2 – Выход легких углеводородов в зависимости от типа реактора и разновидности нефтяных отходов

Месторождение (тип канала реактора)	Суммарная концентрация УВ, об %
Месторождение А (гладкий канал, без выступов)	88,6–92,4
Месторождение Б (гладкий канал, без выступов)	91,0–93,6
Месторождение А (модифицированный канал)	89,8–94,6
Месторождение Б (модифицированный канал)	91,6–96,2

Наиболее высокие показатели выхода суммарной концентрации легких углеводородов говорят о более интенсивной передаче тепловой мощности при использовании реакторного агрегата с двухэлементным корпусом в виде комбинированного теплообменного элемента с термоконтактной поверхностью, образованной полусферическими выступами высотой 2 мм. Кроме этого, время нагрева органических отходов в реакторном агрегате с комбинированным теплообменным элементом занимает меньше времени по сравнению с реакторным агрегатом без модификации. При этом по сравнению с гладким каналом канал с выступами в среднем может увеличивать теплоотдачу до 2,23 раз.

В четвертой главе диссертации предложены технологическая операция замыкания контура металлического листа малой толщины и технологические рекомендации по образованию термоконтактной поверхности. Показано влияние различных видов механической обработки склеиваемых поверхностей на прочность адгезионного соединения. Установлено влияние температуры сушки клеевого шва на время отверждения. Предложено выражение для расчета прочности соединения термоконтактная поверхность – внутренний корпус реактора. Приводится описание технологической реакторной линии и вспомогательного оборудования для наиболее эффективной термической деструкции углеводородных отходов.

Полученные результаты показывают, что наиболее высокие показатели прочности достигаются при шероховатости, полученной путем фрезерования. При пескоструйной обработке – наиболее низкие. Увеличение температуры при сборке комбинированного теплообменного элемента способствует более быстрому затвердеванию клеевого шва, что приводит к экономии времени на производстве. Влияние температуры сушки на время отверждения клеевого шва можно продемонстрировать на примере эпоксидных клеевых композиций Araldite-101 с отвердителем 951 и Araldite-103 с отвердителем 930 (рисунок 7).

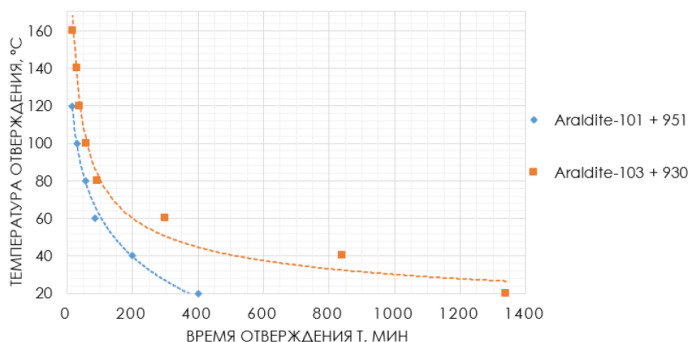


Рисунок 7 – Изменение времени отверждения эпоксидных смол Araldite в зависимости от температуры

Расчет прочности соединения термоконтактная поверхность – корпус реактора, а также различных термоконтактных поверхностей с корпусом оборудования цилиндрической формы можно определить через разрушающее напряжение:

$$\tau = K\tau_{\text{ак}}, \quad (8)$$

где K – интегральный поправочный коэффициент, определяемый из выражения $K=k_1k_2k_3k_4k_5k_6k_7k_8$, коэффициенты которого определяются из эмпирических или справочных данных; коэффициент k_1 – учитывающий тип материала; k_2 – величина клевого шва; k_3 – величина шероховатости сопрягаемых поверхностей; k_4 – масштабный фактор; k_5 – тип соединения (посадки); k_6 – способ нагружения (статическая нагрузка, длительная или кратковременная); k_7 – рабочая температура эксплуатации; k_8 – способ отверждения (при комнатной или повышенной температуре); $\tau_{\text{ак}}$ – предел прочности клевого шва при аксиальном сдвиге, МПа.

Использование комбинированного теплообменного элемента целесообразно в реакторе пиролиза секционного типа (патент РФ № 2677184) совместно с завихрителями газового потока (патент РФ № 2703643) в составе технологической установки (патент РФ № 2649357). Комбинированное применение позволит повысить эффективность и производительность переработки органических отходов.

В пятой главе диссертации описано использование и внедрение основных результатов исследований с целью производства тепломассообменных устройств для нужд промышленности.

В заключении диссертации изложены основные результаты исследований и выводы по работе.

В приложении представлены акты производственных испытаний и внедрения результатов исследований.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате диссертационного исследования была поставлена, рассмотрена и решена научно-техническая проблема по модификации реакторных агрегатов на основе формирования сфероидальных выступов. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Произведена классификация утилизирующих реакторных агрегатов с установлением их конструктивных особенностей. Определен уровень развития техники и технологий изготовления утилизирующих реакторных агрегатов, а также изготовления термоконтактных поверхностей, интенсифицирующих теплообмен в данных системах. В результате этого установлено, что современные утилизирующие реакторы состоят из

множества деталей, интенсификаторы теплообмена в которых играют важную роль по обеспечению эффективности и производительности их работы. Технологии изготовления существующих интенсификаторов теплообмена сопряжены с рядом технологических проблем, таких как использование специального оборудования, невозможность работы с трубами и каналами большого диаметра и толщины, а также использование большого количества металла при их производстве.

2. Разработана универсальная технология модификации утилизирующих реакторных агрегатов, основанная на изготовлении двухэлементного корпуса в виде комбинированного теплообменного элемента с термоконтактной поверхностью. Данная технология состоит из нескольких этапов, включающая в себя формирование термоконтактной поверхности на листовом металле, придание листовому металлу формы корпуса реакторного агрегата, обработку и фиксацию теплообменного элемента в корпусе технологического реактора с помощью клеевой композиции, в результате чего образуется комбинированный теплообменный элемент.

3. Проведена оценка эффективности применения реактора с двухэлементным корпусом в виде комбинированного теплообменного элемента путем имитационного математического моделирования в процессе термической деструкции углеводородных отходов, термоконтактные поверхности которого образованы полусферическими выступами высотой от 1 до 4 мм. При этом шаг и высота выступов определялись исходя из приведённых поправочных коэффициентов. В качестве теплоносителя использовался азот, в качестве сырья – отработанное масло.

4. В результате имитационного математического моделирования установлено, что изменение скорости течения теплоносителя в диапазоне от 1 до 5 м/с приводит к увеличению средней температуры реакционной камеры реакторного агрегата в зависимости от высоты и шага неровностей, которое достигает 11,9 %. С помощью математических методов проведено описание взаимосвязей и оптимизация конструктивно-технологических и режимных параметров реакторного агрегата с термоконтактной поверхностью. В результате установлено, что скорость течения теплоносителя должна быть равна $v = 3$ м/с. Шаг вдоль направляющей $k = 10,533$ мм, отношение $t/h = 12,223$. Температура в реакционной камере реакторного агрегата при этом составляет $T = 600,87$ °C.

5. Использование комбинированного теплообменного элемента с термоконтактной поверхностью, образованной полусферическими выступами, способствует повышению теплопередачи, что можно объяснить увеличением площади поверхности теплообмена, более ранним переходом течения теплоносителя от ламинарного к турбулентному, а также образованием дополнительных завихрений от выступов.

6. Теоретический анализ показывает, что процесс образования термоконтактной поверхности можно охарактеризовать как плоское

деформированное состояние, усилие которого рассчитывается исходя из уравнений, представленных в соответствующей главе данной работы. Рекомендуемые значения шероховатости при фиксации теплообменного элемента находятся в диапазоне 2,5–5 мкм по Ra для плоских деталей и $Ra = 1,6$ –3,2 мкм – для цилиндрических. Толщина клеевого слоя составляет 0,03–0,5 мм в зависимости от основы клеевой композиции.

7. Установлено, что определение необходимого усилия формообразования можно осуществлять через выражение для прогиба пластины, контур которой ограничен на определённом участке. При применении данного выражения расхождение между расчётными и экспериментальными значениями составляет 5,3–8 %. Значения прогиба, найденные экспериментальным путем, больше расчетных. Установлено, что при увеличении скорости формообразования наблюдается отклонение формы термоконтактной поверхности от образующего его инструмента.

8. Исследование прочности клеевого соединения позволяют сделать вывод о том, что максимальная прочность на сдвиг пары металл – металл из нержавеющей стали достигается при значениях шероховатости ~3,2 мкм по Ra . Увеличение температуры клеевого шва с 25 до 400 °С приводит к резкому снижению его прочности. Дальнейшее увеличение температуры до 600 °С характеризуется устоявшимся режимом снижения прочности с незначительным его уменьшением. Отклонение данных от средней величины составило 2–7 %. Максимальная сдвиговая прочность достигается при толщине клеевого шва 0,05 мм, а его увеличение до значений 0,5 мм способствует двукратному уменьшению прочности на сдвиг.

9. Исследование применения реакторного агрегата в двухэлементном корпусе на экспериментальном стенде при утилизации нефтяных отходов месторождений Красноярского края показало, что в зависимости от времени пребывания сырья в реакционной зоне реактора возрастает суммарная концентрация легких углеводородов до 2,6 %. Относительная погрешность измерения составляет $\pm 0,25$ %. Улучшение выхода газообразных продуктов термической деструкции обосновывается лучшей конверсией процесса. Оптимальное время реакции при этом составляет от 25 до 40 минут при установившейся температуре 500 °С в реакционной камере реактора. Благодаря использованию термоконтактной поверхности с полусферическими выступами удалось сократить время нагрева сырья.

10. Предложена технологическая операция по образованию фиксирующего замка термоконтактной поверхности, образованной на металлическом листе малой толщины, с определением необходимого усилия. Показано влияние различных видов механической обработки, образующих шероховатость поверхности, на прочность клеевого соединения.

11. Показано влияние температуры на время отверждения клеевого шва. Предложен способ расчета прочности цилиндрических клеевых соединений. Совокупность данных рекомендаций позволит более эффективно подходить

к производству двухэлементных корпусов теплообменного оборудования в виде комбинированного теплообменного элемента на производстве. Показана и описана реакторная линия, конструкция секционного реактора пиролиза и завихрителя газового потока, использование которых в совокупности с их доказанной эффективностью позволит более продуктивно утилизировать органические отходы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАК

1. Петровский, Э.А. Современные технологии переработки нефтешламов / Э.А. Петровский, Е.А. Соловьёв, **О.А. Коленчуков** // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 4. – С. 124–132.

2. **Коленчуков, О.А.** Повышение качества продуктов пиролиза при утилизации углеводородных отходов / О.А. Коленчуков, Э.А. Петровский, А.Ю. Михайлов // Естественные и технические науки. – 2019. – № 12. – С. 369–372.

3. **Коленчуков, О.А.** Разработка технологических энергосберегающих система на основе пиролизных реакторов / О.А. Коленчуков, Э.А. Петровский // Нефтегазовое дело. – 2020. – № 1. – С. 130–136.

4. Петровский, Э.А. Технологическая реакторная линия для повышения эффективности пиролиза нефтесодержащих отходов / Э.А. Петровский, **О.А. Коленчуков**, Н.А. Смирнов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2021. – № 4. – С. 16–20.

5. **Коленчуков, О.А.** Исследование технологии формирования термоконтактных поверхностей интенсификаторов теплообменных процессов / О.А. Коленчуков, Э.А. Петровский // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 2. – С. 94–101.

6. **Коленчуков, О.А.** Исследование влияния качества поверхности при изготовлении комбинированных теплообменных элементов технологических реакторов путем склеивания / О.А. Коленчуков, Э.А. Петровский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 30–39.

Публикации в журналах из перечня Scopus

7. **Kolenchukov, O.A.** Analysis of the causes of failures of pyrolysis units / O.A. Kolenchukov, E.A. Petrovsky // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399. – 5 p.

8. Simulating the hydrocarbon waste pyrolysis in reactors of various designs / **O.A. Kolenchukov**, E.A. Petrovsky, K.A. Bashnur [et al.] // SOCAR Proceedings. – 2021. – № 2. – 7 p.

9. Интенсификаторы с дискретно-шероховатой поверхностью в установках термической деструкции: современное состояние исследований и

будущий потенциал / **О.А. Коленчуков**, Т.Н. Коленчукова, К.А. Башмур [et al.] // SOCAR Proceedings. – 2023. – № 1. – 8 с.

10. Анализ современных технологий переработки и утилизации углеводородных отходов термическими способами / **О.А. Коленчуков**, К.А. Башмур, Е.Д. Агафонов [et al.] // SOCAR Proceedings. – 2023. – № 2. – 11 с.

11. Numerical and Experimental Study of Heat Transfer in Pyrolysis Reactor Heat Exchange Channels with Different Hemispherical Protrusion Geometries / **О.А. Kolenchukov**, К.А. Bashmur, S.O. Kurashkin [et al.] // Energies. – 2023. – № 16. – 27 p.

Публикации в других изданиях

12. **Коленчуков, О.А.** Классификация пиролизных агрегатов для утилизации нефтяных шламов и отходов органического происхождения / О.А. Коленчуков // Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сборник научных статей девятой международной научной конференции (Казань, 31 октября 2019 г.). – Казань, 2019. – Ч. 1. – С. 97–98.

13. **Коленчуков, О.А.** Способы интенсификации теплообмена при пиролизе углеводородных отходов / О.А. Коленчуков // Избранные вопросы науки XXI века: сборник научных статей. – Москва, 2019. – Ч. III. – С. 129–132.

14. **Коленчуков, О.А.** Сборка комбинированных цилиндрических обечаек технологических реакторов с помощью клеевых композиций / О.А. Коленчуков // Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности: сборник научных статей XI международной научной конференции (Волгоград, 18-19 ноября 2021 г.). – Волгоград, 2021. – Ч. 1. – С. 40–43.

15. **Коленчуков, О.А.** Термостойкие клеевые составы для изготовления комбинированной теплообменной поверхности / О.А. Коленчуков, Э.А. Петровский // Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов: сборник материалов VI международной научно-практической конференции (Москва, 6 декабря 2021 г.). – Москва, 2021. – С. 175–178.

16. **Коленчуков, О.А.** Инструмент для формообразования термоконтактной поверхности тепломассообменных реакторных систем / О.А. Коленчуков // Проспект Свободный – 2022: материалы XVIII международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Красноярск, 25–30 апреля 2022 г.). – Красноярск, 2022. – 5 с.

17. Разработка технологического оборудования для производства биотопливных композиций / В.В. Бухтояров, К.А. Башмур, **О.А. Коленчуков** [и др.]. – Красноярск – Старый Оскол, 2022. – 232 с.

Патенты

18. Пат. 2649357 Российская Федерация, МПК F23G 5/027, F23G 7/05. Пиролизная установка для утилизации нефтешламов / Соловьёв Е.А., **Коленчуков О.А.**, Петровский Э.А.; заявитель и патентообладатель

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». – № 2017123417; заявл. 03.07.2017; опубл. 24.04.2018, Бюл. № 10. – 9 с.

19. Пат. 2677184 Российская Федерация, МПК F23G 5/027, F23G 7/05. Секционный реактор пиролиза / **Коленчуков О.А.**, Соловьёв Е.А.; заявитель и патентообладатель Коленчуков Олег Александрович, Соловьёв Евгений Алексеевич. – № 2017138364; заявл. 02.11.2017; опубл. 15.01.2019, Бюл. № 2. – 7 с.

20. Пат. 2703643 Российская Федерация, МПК B05B 7/10. Завихритель газового потока / **Коленчуков О.А.**, Петровский Э.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». – № 2019114236; заявл. 07.05.2019; опубл. 21.10.2019, Бюл. № 30. – 9 с.

21. Пат. 2759309 Российская Федерация, МПК F28F 1/40. Теплообменный элемент, способ его изготовления и устройство для его осуществления / **Коленчуков О.А.**, Петровский Э.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». – № 2021105124; заявл. 25.02.2021; опубл. 11.11.2021, Бюл. № 32. – 16 с.

22. Пат. 2789519 Российская Федерация, МПК B01J 8/00, B28B 3/00, C01B 3/00, C01B 32/00. Реактор для получения нановолокнистого углерода и водородной газовой смеси / **Коленчуков О.А.**, Петровский Э.А., Михайлов А.Ю.; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». – № 2022115257; заявл. 06.06.2022; опубл. 06.02.2023, Бюл. № 4. – 17 с.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

23. Свидетельство № 2023665083. Программа для расчета теплопередачи в каналах с дискретно-шероховатой поверхностью теплообмена: программа для ЭВМ / **Коленчуков О.А.**, Бухтояров В.В., Михайлов А.Ю.; правообладатель Коленчуков Олег Александрович. – № 2023619539; заявл. 15.05.2023; опубл. 12.07.2023. – 8 Кб.

Коленчуков Олег Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РЕАКТОРНЫХ
АГРЕГАТОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ
ТЕРМОКОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Специальность: 2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 23.01.2024. Печать плоская.
Формат 60×84/16 Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,4.
Тираж 100 экз. Заказ № 20984

Отпечатано Библиотечно-издательским комплексом
Сибирского федерального университета
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-16; <http://bik.sfu-kras.ru>
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru