

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Коленчуков Олег Александрович

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

Специальность: 2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Петровский Э.А.

Красноярск 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕАКТОРНЫХ СИСТЕМ	13
1.1 Классификация существующих реакторных агрегатов и технологий изготовления реакторных систем	13
1.2 Проблема формирования термоконтактных поверхностей и технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик реакторных агрегатов	28
1.2.1 Турбулизирующие вставки	30
1.2.2 Дискретно-шероховатые, или термоконтактные, поверхности	32
1.2.3 Иные методы интенсификации.....	39
1.3 Постановка цели и задач исследования	51
1.4 Выводы	52
2 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕРМОКОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ ВЛИЯНИЯ НА ТЕПЛООБМЕН.....	53
2.1 Обоснование необходимости совершенствования корпуса реакторного агрегата.....	53
2.2 Технология изготовления двухэлементного корпуса реакторного агрегата в виде комбинированного теплообменного элемента	55
2.3 Математическое моделирование процессов теплообмена в реакторных агрегатах с двухэлементным корпусом	59
2.3.1 Исследование влияния термоконтактных поверхностей двухэлементного реакторного агрегата на характеристики течения газа в цилиндрическом канале.....	59
2.3.2 Оценка эффективности применения термоконтактных поверхностей в реакторных агрегатах.....	70
2.4 Определение режимных параметров формирования термоконтактной поверхности корпуса реакторного агрегата	86

2.5 Обработка поверхности и ее влияние на характер клеевого соединения	95
2.6 Определение технологических параметров для склеивания двухэлементного корпуса реакторного агрегата	102
2.7 Выводы	107
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХЭЛЕМЕНТНОГО РЕАКТОРНОГО АГРЕГАТА ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ	109
3.1 Методика исследований формирования термоконтактной поверхности	109
3.2 Анализ результатов исследований образования термоконтактной поверхности	112
3.3 Исследование технологических параметров сборки двухэлементного корпуса реакторного агрегата.....	115
3.4 Экспериментальное определение оптимальных технологических параметров сборки двухэлементного корпуса реакторного агрегата.....	119
3.5 Экспериментальный стенд для исследования производительности работы реакторного агрегата с двухэлементным корпусом	123
3.5.1 Описание экспериментальной установки и методики экспериментальных исследований	123
3.5.2 Результаты исследований и их обсуждение	128
3.6 Выводы	138
4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОМЫШЛЕННОМУ ИЗГОТОВЛЕНИЮ И ПРИМЕНЕНИЮ ДВУХЭЛЕМЕНТНОГО КОРПУСА В ВИДЕ КОМБИНИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕННОГО ЭЛЕМЕНТА	139
4.1 Технологические рекомендации по образованию термоконтактной поверхности	139
4.2 Технологические рекомендации по сборке комбинированного теплообменного элемента	140
4.3 Применение комбинированного теплообменного элемента в составе технологического оборудования реакторной линии	145

4.4 Выводы	149
5 ПРОМЫШЛЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	150
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	155
Приложение	176

ВВЕДЕНИЕ

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 термоконтактной поверхностью;
- провести имитационное математическое моделирование в программном комплексе COMSOL Multiphysics реакторного агрегата с модифицированной термоконтактной 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 термоконтактной поверхности на выход продуктов термической деструкции на основе натурных экспериментов;

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

Соответствие диссертации паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности 2.5.21 «Машины, агрегаты и технологические процессы», а именно следующим областям исследований:

6. Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов и технологических процессов и оценки их экономической и энергетической эффективности и ресурса.

8. Разработка и повышение эффективности методов предиктивного анализа, технического обслуживания, диагностики, ремонтпригодности и технологии ремонта машин и агрегатов в целях обеспечения надежной и безопасной эксплуатации.

9. Разработка научных и методологических основ проектирования и практической реализации технологических процессов и способов получения и обработки материалов, обеспечивающих экологическую безопасность, экономию материальных и энергетических ресурсов, формирующих комплекс свойств, качество и расширяющих номенклатуру изготавливаемой продукции.

Научная новизна:

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

– исследовано повышение качества теплообменных процессов реакторных агрегатов на основе геометрического модифицирования термоконтактной 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 термоконтактных 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 термоконтактной 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 multifunctional 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.

Личный вклад автора заключается в постановке задач диссертационной работы, выполнении значительного объема теоретических исследований, в том числе имитационного математического моделирования, проведении экспериментальных исследований по формированию термоконтактной поверхности и термической деструкции углеводородных отходов, анализе и обобщении полученных результатов, а также подготовке к публикации статей, патентов и докладов конференций.

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 «Перспективны – 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.

1 ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕАКТОРНЫХ СИСТЕМ

1.1 Классификация существующих реакторных агрегатов и технологий изготовления реакторных систем

Все известные реакторные устройства для различных отраслей промышленности по функциональному назначению можно разделить на следующие: физические, химические, биологические и комбинированные (рисунок 1).

В последние десятилетия ежегодно возрастает спрос на углеводороды, что приводит к увеличению образующихся нефтеотходов в результате добычи, переработки и хранения углеводородного сырья [1–5]. Ввиду этого остро встает вопрос об утилизации отходов с целью снижения техногенного воздействия на окружающую среду. Наибольшую популярность в данном направлении получили утилизирующие реакторные агрегаты, принцип действия которых основан на химических преобразованиях при высоких температурах [6–10]. Такие устройства позволяют получать различные полезные продукты для химической и энергетической промышленности.

При анализе литературных источников [11–22] установлено, что на сегодняшний день были разработаны различные виды конструкций реакторных агрегатов, принцип действия которых основан на термическом разложении углеводородной части отходов на составные, более простые части. Подавляющее количество известных реакторных устройств представляет собой частную конструкцию теплообменных агрегатов.

По конструктивному признаку термохимические реакторные агрегаты разделены следующим образом: 1) по форме корпуса: вертикальные и горизонтальные; 2) по степени мобильности: мобильные, стационарные; 3) по количеству рабочих секций (камер): односекционные, многосекционные; 4) по

расположению нагревателей: внутренний, наружный; 5) по виду нагревателя: электрический, газожидкостный, иной; 6) по наличию вспомогательных рабочих органов: со вспомогательными рабочими органами, без вспомогательных рабочих органов; 7) по форме корпуса: цилиндрический, параллелепипед, иной формы (рисунок 1).

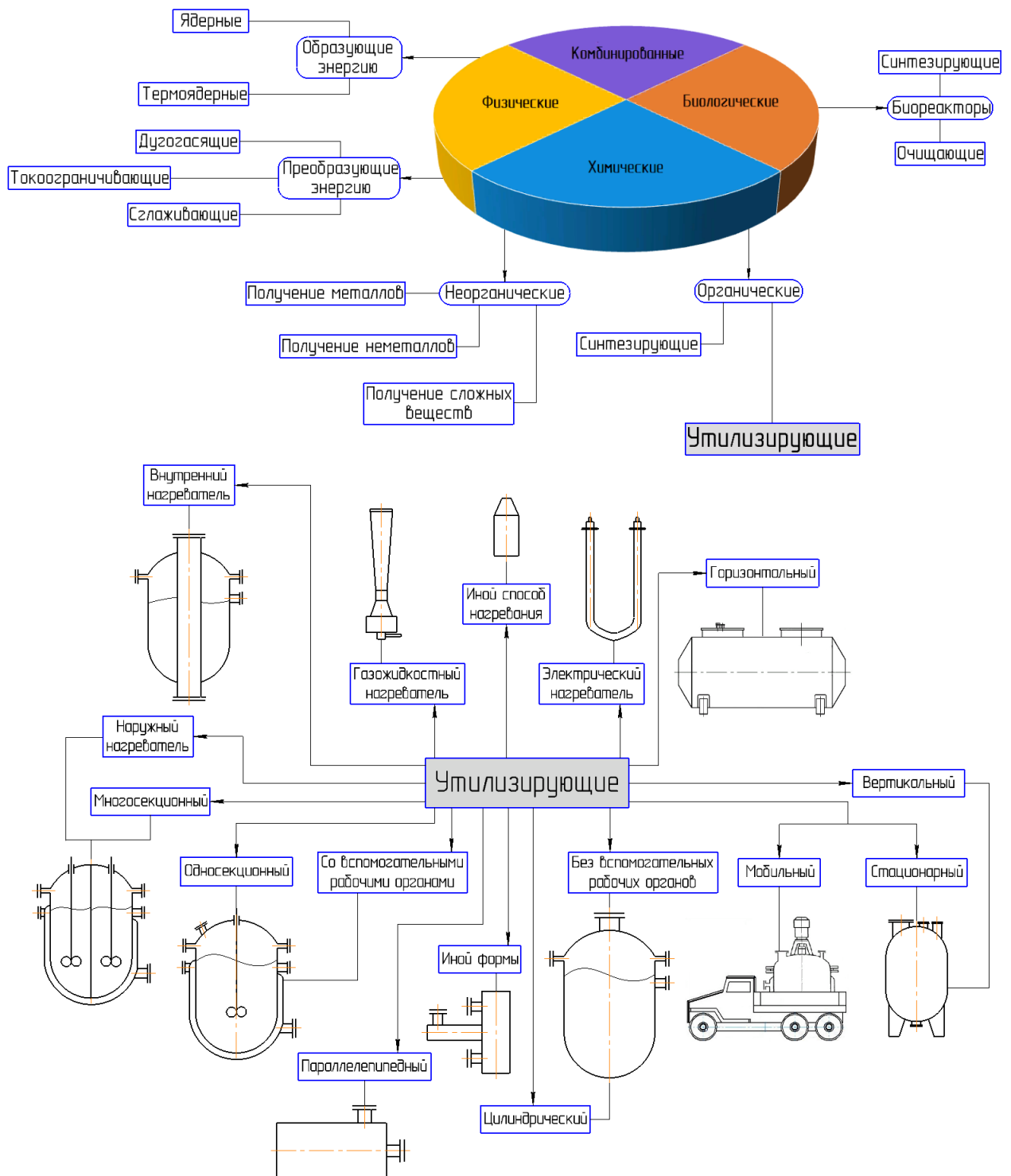


Рисунок 1 – Классификация реакторных агрегатов

Утилизирующие реакторные агрегаты производят различные мировые и отечественные предприятия. Для установления путей модернизации реакторных агрегатов необходимо произвести обзор некоторых существующих технических решений с определением их конструктивных особенностей и недостатков.

Одной из основных утилизирующих установок, представленных на рынке Российской Федерации, является установка термической деструкции УТД-2, выпускаемая промышленной группой «Безопасные технологии» (рисунок 2). Особенность данной установки заключается в использовании нагревательных элементов в нижней части пиролизного агрегата (рисунок 3). Благодаря этому увеличивается общая площадь нагрева, что приводит к более производительной работе агрегата. Подобную технологию процесса пиролиза и конструктивные особенности реакторного агрегата можно наблюдать в установках марки BLJ-16 от китайской компании BestonGroup [6, 23].

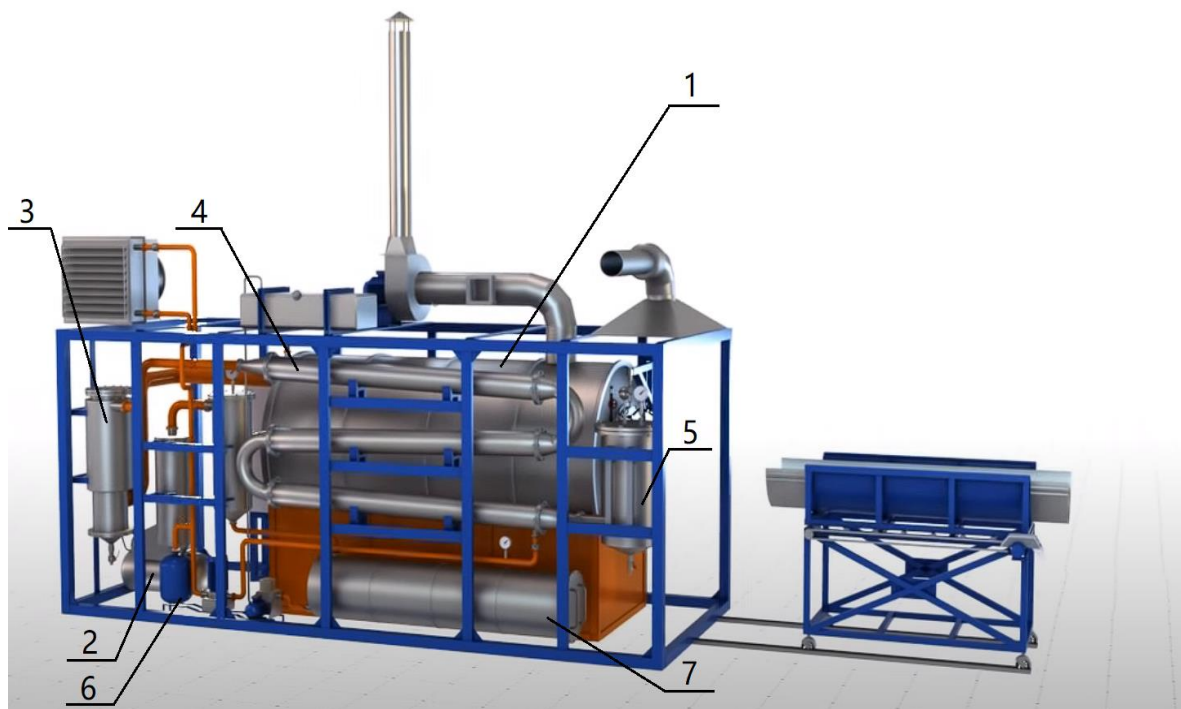


Рисунок 2 – Технологическая схема установки термической деструкции УТД-2:
 1 – пиролизный агрегат (камера для осуществления пиролиза); 2 – компрессор; 3 – фильтр для очистки пиролизных газов; 4 – теплообменный аппарат; 5 – газожидкостный сепаратор; 6 – расширительный бак; 7 – накопительный бак

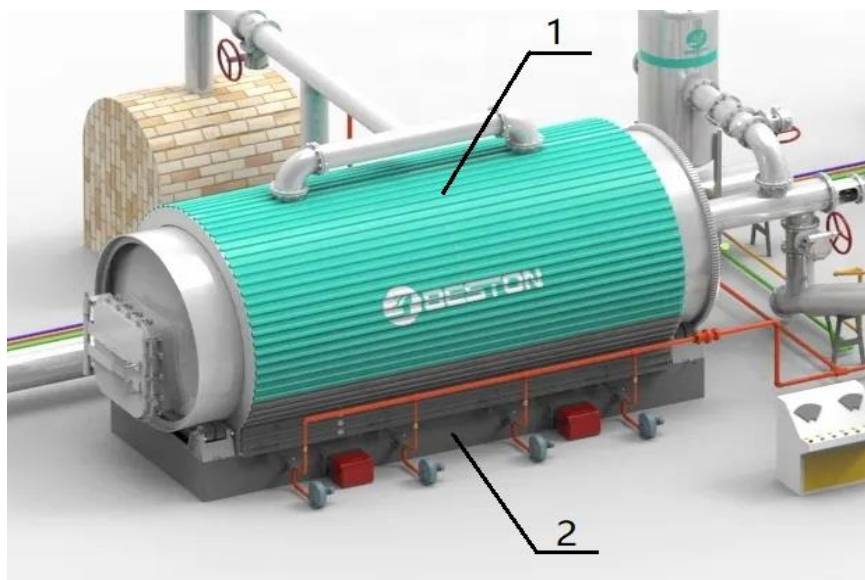


Рисунок 3 – Схема расположения нагревательных элементов в установках термической деструкции УТД-2 и BLJ-16:

1 – реакторный агрегат; 2 – блок с нагревательными элементами

Дальнейшее развитие установки УТД-2 привело к возникновению реакторного агрегата с вращающейся камерой (рисунок 4). Данная конструкция схожа по своим конструктивным признакам с установками BLL-30 и BLL-20, выпускаемые китайскими компаниями Beston и KingTiger [24–26]. Данное конструктивное решение способствует более равномерному распределению тепла и снижению времени нахождения сырья в реакторе, что, в свою очередь, повышает производительность реакторного агрегата. Хотя установка вращающейся камеры пиролиза и способствует повышению производительности процесса, одновременно с этим происходит и снижение его эффективности. Это связано с дополнительными энергозатратами, необходимыми для приведения в движение камеры пиролиза с помощью механического привода. К тому же вращающийся реактор является дорогостоящим и сложным в изготовлении.

Изготовлением современных пиролизных агрегатов и готовых технологических линий занимается нидерландская компания Pyrolyze Converting waste to power [27]. Технологическая схема переработки установки представлена на рисунке 5. Особенность работы данного пиролизного агрегата заключается в воздействии на сырье высокими температурами. При таком воздействии

обеспечивается высокая степень переработки отходов, но значительно возрастают энергетические затраты, что может сказаться на эффективности процесса.

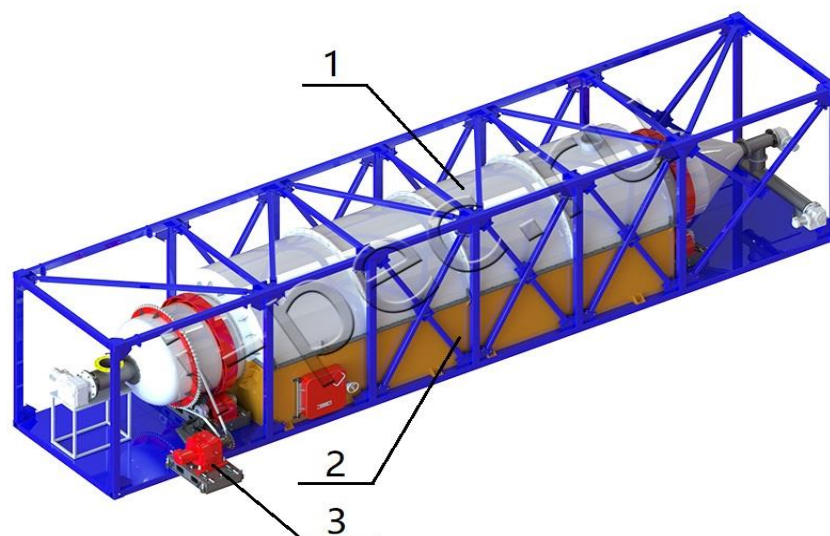


Рисунок 4 – Установка термической деструкции УТД-2-1000 с вращающимся корпусом реактора:

1 – реакторный агрегат; 2 – блок с нагревательными элементами; 3 – привод

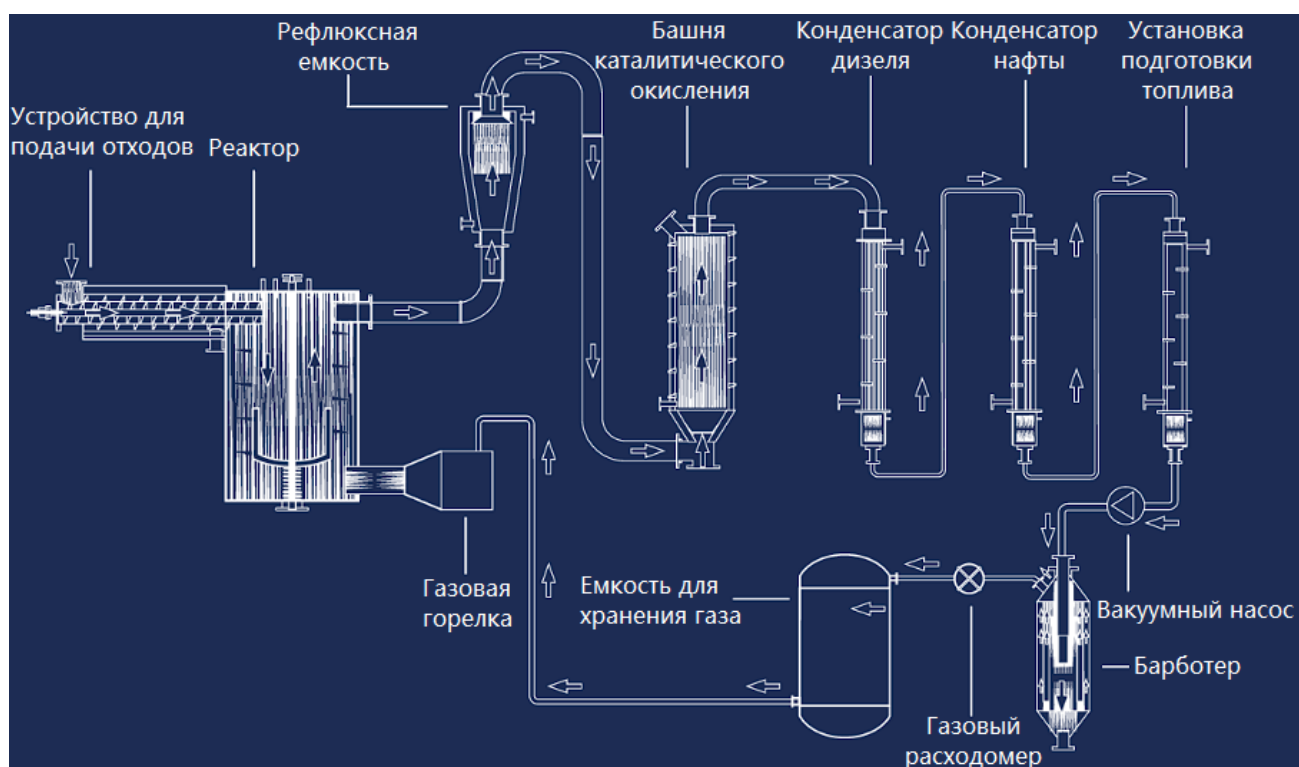


Рисунок 5 – Технологическая схема переработки углеводородных отходов

Компанией ООО НПФ «Энергия» разработана пиролизная установка для переработки разнообразных углеводородных отходов, в том числе тяжелых отходов нефтепереработки. В пиролизном агрегате данной установки реализована технология термоудара. Такой подход позволяет обеспечивать мгновенный нагрев углеводородных отходов со скоростью порядка $\sim 10^4$ градусов в секунду. Недостаток технологии термоудара заключается в высоких энергетических затратах [28].

Помимо серийно выпускаемых реакторных агрегатов для термической деструкции углеводородных отходов, существует также большое разнообразие инновационных технических решений. Так как подавляющая часть данных решений основана на однотипных подходах к обеспечению эффективной переработки органических веществ, то целесообразно рассмотреть некоторые из них.

Из современной техники известна установка для пиролиза углеводородных отходов [29]. В состав установки входит термореактор с установленными внутри электронагревателем и катализатором. При этом электронагреватель выполнен с возможностью образования вокруг него при пиролизе угольного осадка, фильтрующего образующийся в реакторе пиролизный газ, и с внутренней полостью, сообщенной с внутренним объемом термореактора и системой отвода пиролизных газов. Кроме этого, пиролизная установка содержит дополнительное оборудование в виде отстойника, соединенного с конденсатором, гидрозатворы, насос, приемники жидких углеводородов и др. (рисунки 6, 7).

Недостатками представленного пиролизного агрегата, входящего в состав пиролизной установки, являются низкая производительность процесса, обусловленная конструктивными особенностями реактора, а также высокие энергетические затраты, связанные с использованием электронагрева. К недостаткам также стоит отнести низкую эффективность процесса, связанную с неполной переработкой отходов из-за неравномерного прогрева объема угля (малая теплопроводность).

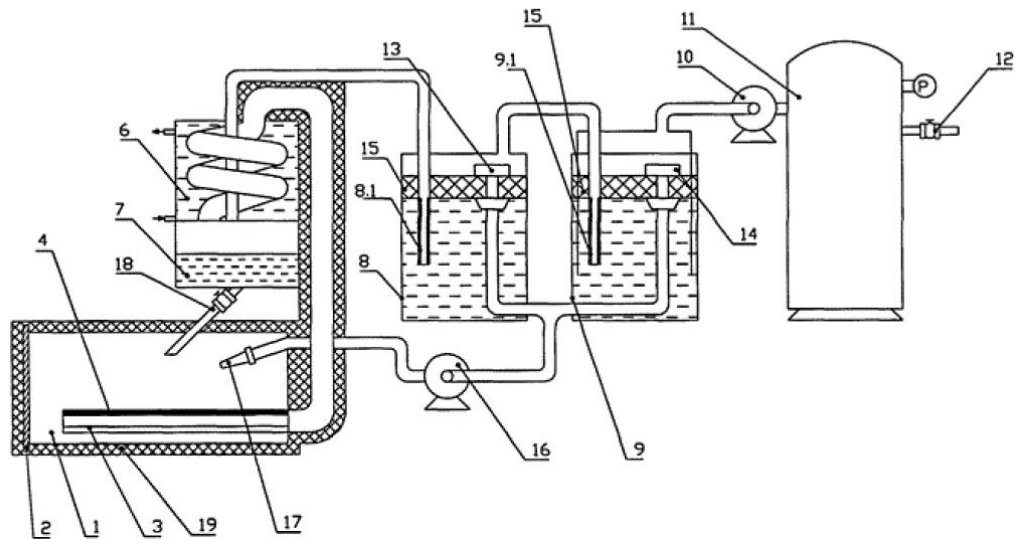


Рисунок 6 – Общая конструкция установки для пиролиза углеводородных отходов в разрезе:

1 – термореактор; 2 – крышка; 3 – электронагреватель; 4 – катализатор; 6 – конденсатор; 7 – отстойник для жидких осадков; 8 – гидрозатвор; 9 – измерительный гидрозатвор; 8.1, 9.1 – катализаторы; 10 – компрессор; 11 – ресивер; 12 – вентиль; 13, 14 – приемники для жидких углеводородов; 15 – жидкие углеводороды; 16 – насос; 17 – форсунка; 18 – вентиль; 19 – теплоизоляционное покрытие [29]

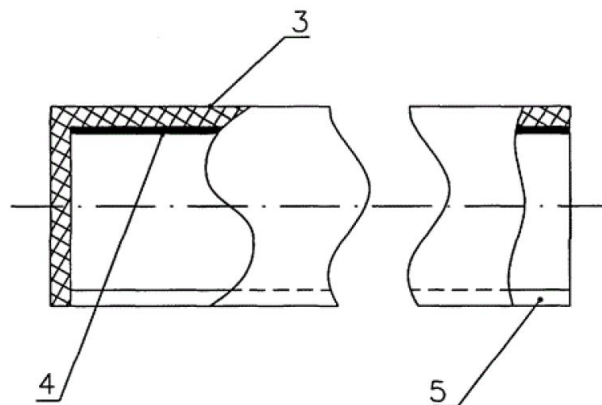


Рисунок 7 – Вид электронагревателя в разрезе:

3 – электронагреватель; 4 – катализатор; 5 – газоприемная щель [29]

Из работы [30] известно устройство для переработки отходов нефти с высоким содержанием кислотосодержащих веществ и тяжелых парафинов в полезную продукцию. Устройство содержит корпус с полостью и нагреватель

поверхности. Корпус устройства выполнен из жаропрочного материала, а полость – в форме правильного цилиндра с пазом вдоль оси вращения. В пазу корпуса расположена труба для подачи нефтяных отходов через плоскую фильеру на барабан и труба для удаления продуктов пиролизного газа. В корпусе также расположено окно для удаления шлака, а на поверхности барабана и обоих дисков размещен скребок, жестко закрепленный в корпусе. Кроме этого, на обоих торцах барабана находятся два диска, имеющие высокую разность электрического потенциала, а в пазу корпуса – труба для удаления продуктов пиролизного газа и для создания низкого вакуума (рисунок 8).

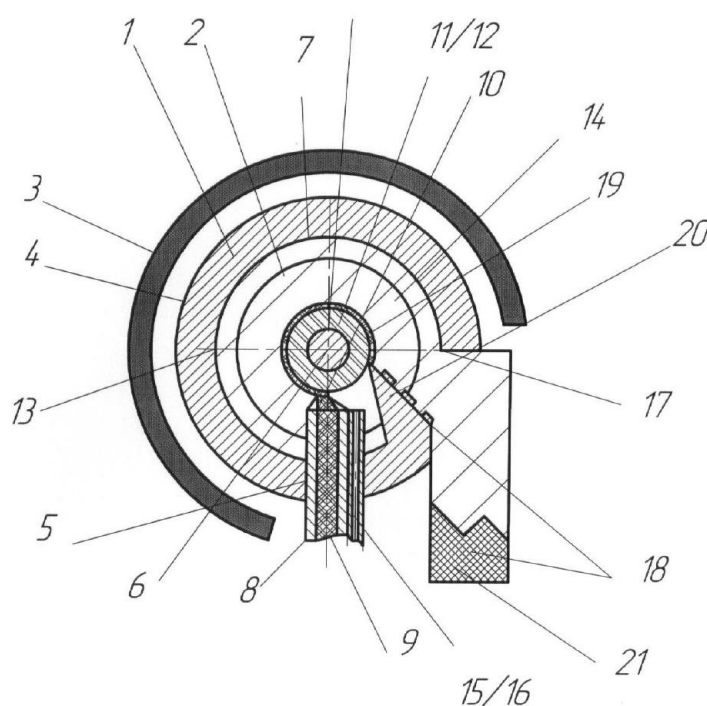


Рисунок 8 – Устройство для переработки отходов нефти с высоким содержанием кислотосодержащих веществ и тяжелых парафинов в полезные продукты:

1 – корпус; 2 – полость; 3 – нагреватели; 4 – поверхности; 5 – паз; 6 – ось вращения; 7 – внутренняя поверхность; 8 – труба для подачи отходов; 9 – отходы; 10 – фильера; 11 – барабан; 12 – вал; 13 – торцы барабана; 14 – диски; 15/16 – труба для удаления продуктов пиролизного газа и для создания низкого вакуума; 17 – окно для удаления шлака; 18 – шлак; 19 – торцевые поверхности; 20 – скребок; 21 – бункер-накопитель [30]

Недостатки данного устройства заключаются в сложности конструкции пиролизного агрегата, обусловленные объединением нескольких производственных этапов в единый корпус, а также в высоких капитальных затратах, связанных с изготовлением излучателя сверхвысоких частот. Кроме этого, необходим подбор оптимальных режимных параметров для каждого исходного продукта с целью минимизации содержания высокомолекулярных углеводов и серосодержащих соединений в конечном продукте.

Автором работы [31] разработан реактор для переработки органических отходов и нефтешламов. Данный реактор содержит множество различных частей, которые выполняют определенную функцию, в результате чего данный реактор можно назвать реакторным агрегатом. Реакторный агрегат содержит узел загрузки отходов, камеру газификации, узел фильтрации со слоем абсорбента и теплообменник. Также, в реакторный агрегат введены лазер импульсного типа, ресивер и мембранный кислородный генератор. В узле загрузки отходов выполнен экструдер с камерой прессования. Между узлом фильтрации и ресивером установлен шнековый конвейер (рисунок 9).

К недостаткам данного реакторного агрегата можно отнести аппаратную и технологическую сложность, повышенные энергетические затраты, связанные с использованием лазерного источника энергии, а также низкую производительность.

Из технического уровня известен способ и устройство переработки бытовых и промышленных органических отходов [32]. В состав настоящего устройства входит реакторный агрегат, который, в свою очередь, состоит из первой и второй частей, системы разделения парогазовых продуктов пиролиза, а также источника электромагнитного воздействия, установленный во второй части реактора. При этом первая часть реакторного агрегата выполнена в виде приемной емкости, а также внешнего и внутреннего цилиндра. Во внутреннем цилиндре установлен шнек с полым валом, соединенный с приводом. Полый вал содержит патрубки для ввода и вывода горячих газов. Вторая часть реакторного агрегата выполнена в виде герметичных внешнего и внутреннего цилиндров. Вторая часть реакторного

агрегат также содержит шнек, который соединен с приводом. Внешний и внутренний цилиндр имеют группу патрубков. Данная группа состоит из патрубков для ввода и вывода горячих газов, патрубка для соединения с первой частью реакторного агрегата и патрубков для вывода продуктов пиролиза (рисунки 10, 11).

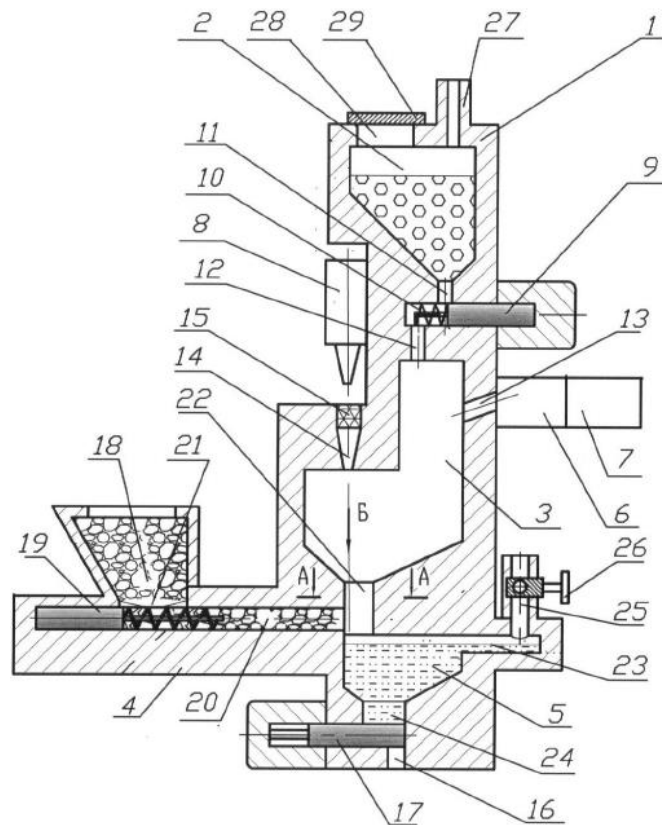


Рисунок 9 – Общий вид реакторного агрегата для переработки органических отходов и нефтешламов:

1 – корпус; 2 – узел фильтрации; 3 – ресивер; 4 – узел загрузки отходов; 5 – камера газификации; 6 – теплообменник; 7 – мембранный кислородный генератор; 8 – лазер импульсного типа; 9 – шнековый конвейер; 10 – канал; 11 – выходное отверстие узла фильтрации; 12 – первое выходное отверстие ресивера; 13 – второе выходное отверстие ресивера; 14 – третье выходное отверстие ресивера; 15 – оптическая линза; 16 – выходное отверстие камеры газификации; 17 – задвижка; 18 – бункер; 19 – экструдер; 20 – камера прессования; 21 – выходное отверстие бункера; 22 – боковая часть щелевого паза; 23 – уровень; 24 – отсек камеры газификации для сбора шлаков; 25 – трубка; 26 – вентиль; 27 – штуцер; 28 – люк; 29 – крышка [31]

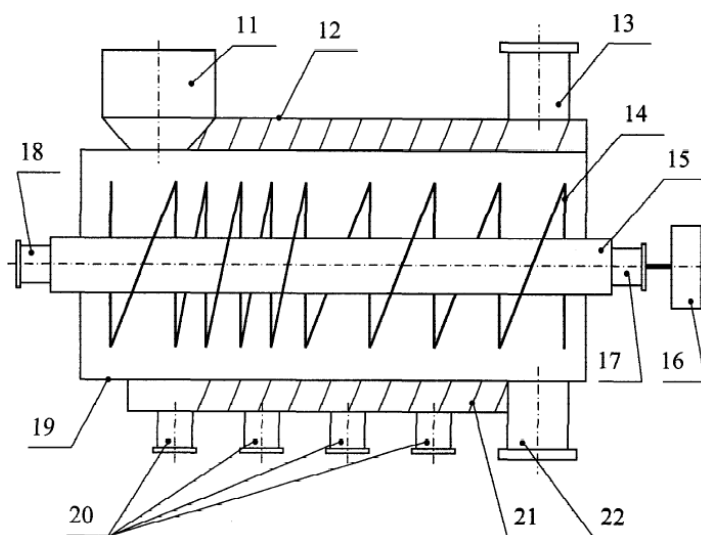


Рисунок 10 – Конструкция первой части реакторного агрегата:

11 – приемная емкость; 12 – внешний цилиндр; 13 – патрубок для отвода горячих газов; 14 – шнек; 15 – полый вал; 16 – привод; 17 – входной патрубок шнека; 18 – выходной патрубок шнека; 19 – внутренний цилиндр; 20 – патрубок ввода горячих газов; 21 – спиралевидная направляющая; 22 – выходной патрубок для соединения первой и второй части реактора [32]

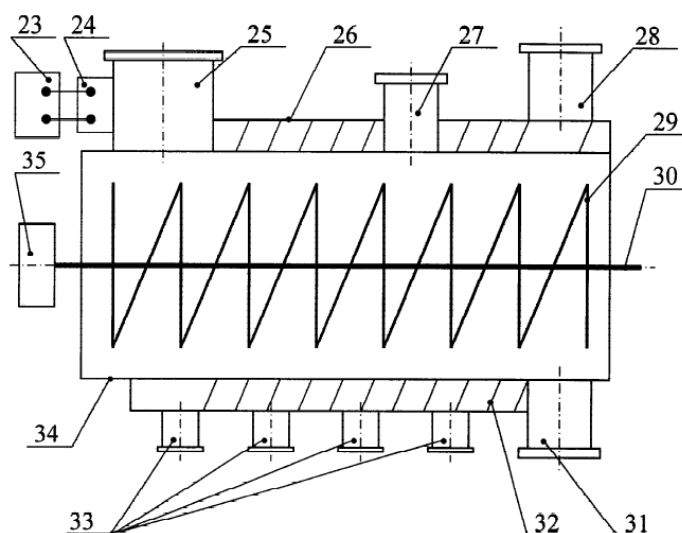


Рисунок 11 – Конструкция второй части реакторного агрегата:

23 – генератор; 24 – группа разрядных устройств; 25 – патрубок; 26 – внешний цилиндр; 27 – патрубок для отвода газообразных продуктов пиролиза; 28 – патрубок для отвода горячих газов; 29 – лопастной шнек; 30 – вал; 31 – патрубок для вывода твердых продуктов; 32 – спиралевидная направляющая; 33 – патрубки для ввода горячих газов; 34 – внутренний цилиндр [32]

К недостаткам известного реакторного агрегата, входящего в состав устройства для переработки бытовых и промышленных отходов, можно отнести: высокие материальные затраты, связанные с изготовлением уплотнений перемешивающих устройств, опор валов перемешивающих устройств и самих перемешивающих устройств, а также значительные энергетические затраты, направленные на разделение продуктов реакции на фракции.

Известен реактор для утилизации отработанных масел [33]. Данный реактор, представляющий собой реакторный агрегат, содержит корпус с разъемными верхним и нижним днищами, топку и мешалку с приводом. Верхнее днище имеет патрубок для входа сырья (подогретого масла), патрубок для вывода парогазовой смеси и предохранительный клапан. Реакторный агрегат также содержит наружную рубашку, которая выполнена в форме винтового канала, и патрубки для ввода и вывода дымовых газов. Внутри наружной рубашки установлен змеевик. Патрубки ввода и вывода дымовых газов также служат для подвода дымовых газов в нижний и отвода из верхнего коллектора, в которые неразъемно установлены линейные теплообменные вертикальные трубы. Трубы, в свою очередь, расположены вокруг комбинированной мешалки рамного и пропеллерного типа (рисунок 12).

К недостаткам заявленного реакторного агрегата можно отнести неравномерность нагрева отработанного масла, связанную с конструктивным исполнением нагревательных элементов, а также одноопорное исполнение комбинированного перемешивающего устройства, в результате чего при воздействии агрессивных сред и высоких температур снижается надежность данного узла, что может привести к опасности в работе с реакторным агрегатом.

Несмотря на большое разнообразие разработанных конструкций, утилизирующие реакторы, как правило, можно представить в виде совокупности следующих элементов:

- корпуса, выполненного в большинстве случаев в форме обечайки, внутри которого происходят реакционные процессы;

- системы нагрева, обеспечивающей подогрев, поддержание и распределение заданной температуры равномерно по всему корпусу реактора;
- системы ввода и вывода, предназначенных для загрузки сырья в реакционную камеру и выгрузки из нее готовой продукции;
- вспомогательных устройств, направленных на интенсификацию реакционных процессов (смесительные устройства, увеличение контактной площади, и др.) и их контроль (запорные устройства, датчики).

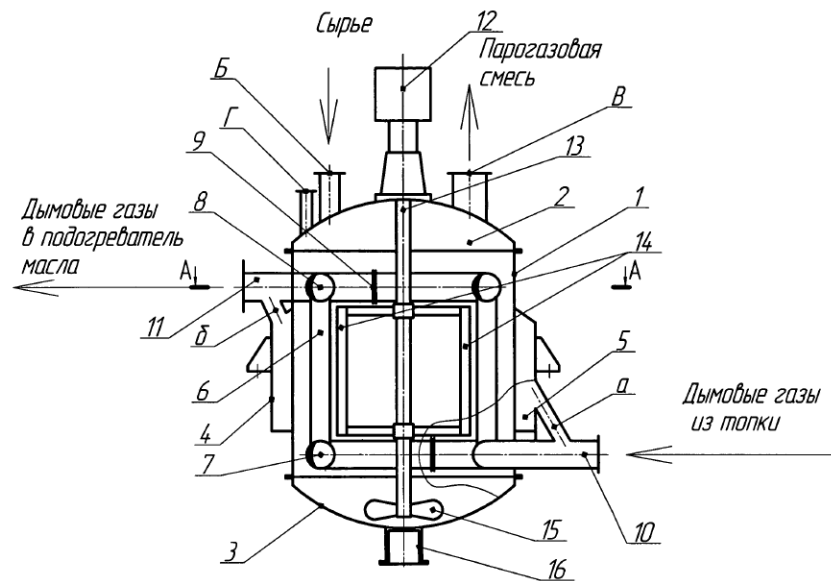


Рисунок 12 – Продольный разрез реакторного агрегата:

- 1 – корпус; 2, 3 – верхнее и нижнее днища; 4 – наружная рубашка; 5 – винтовой канал; 6 – змеевик; 7, 8 – нижний и верхний коллекторы; 9 – фланцевое соединение; 10, 11 – входной и выходной патрубки; 12 – привод; 13 – вертикальный вал; 14, 15 – рамное и пропеллерное перемешивающие устройства; 16 – затвор [33]

Кроме того, общими тенденциями развития утилизирующих реакторных агрегатов являются:

1. Стремление увеличить их эффективность и производительность путем вовлечения в процесс приспособлений, позволяющих интенсифицировать тепломассообменные процессы (применение перемешивающих устройств, различных систем нагрева, увеличение рабочей площади агрегата 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.

Основные 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. [34–43, 11].

За рубежом основные исследования в области утилизирующих реакторных агрегатов активно ведутся в Китае, США и Японии. В меньшей степени представлены результаты исследований таких стран, как Турция, Испания и Саудовская Аравия.

Одной из основных задач в машиностроении является создание и совершенствование методов и технологий изготовления, сборки и обработки деталей машин, характеризующихся минимальными материальными и энергетическими затратами. При этом должно обеспечиваться повышение качества изделий машиностроения и, как следствие, увеличение таких характеристик, как производительность и надежность.

На сегодняшний день технологии изготовления деталей утилизирующих реакторных систем можно представить в виде схемы, изображенной на рисунках 13, 14 [44–50]. Особое внимание следует уделить технологиям изготовления и сборки интенсификаторов теплообмена (теплообменные поверхности, турбулизаторы потока и др.), находящих все большее применение в различных теплообменных агрегатах с целью усиления в них процессов интенсификации [51, 52]. Сущность таких изобретений заключается в закручивании рабочего потока газовой или жидкой среды с помощью контактной части интенсификатора, выполненной в виде макрогеометрии различной геометрической формы.

В результате анализа технологий изготовления утилизирующих реакторов можно выделить следующие ключевые моменты:

– основные элементы корпуса – обечайки, выполняют чаще всего из листового проката методом вальцевания, крышки и днища изготавливают методом фланжирования;

– различные трубы, патрубки, опоры валов и др. выполняют преимущественно из бесшовных стальных труб; валы мешалок имеют специфичную форму и производятся из пруткового проката, как правило, для мелкосерийного производства, с последующей обработкой; рабочие органы мешалок выполняют методами пластической деформации с последующей сваркой;

– большинство завихрителей рабочего потока выполняются прокаткой с последующей обработкой; термоконтактные поверхности изготавливаются из листового материала с последующей фиксацией в теплообменном аппарате с помощью сварки, однако полученные в последние годы высокотемпературные клеящие компоненты позволяют производить фиксацию термоконтактных поверхностей по упрощенной и более эффективной технологии.

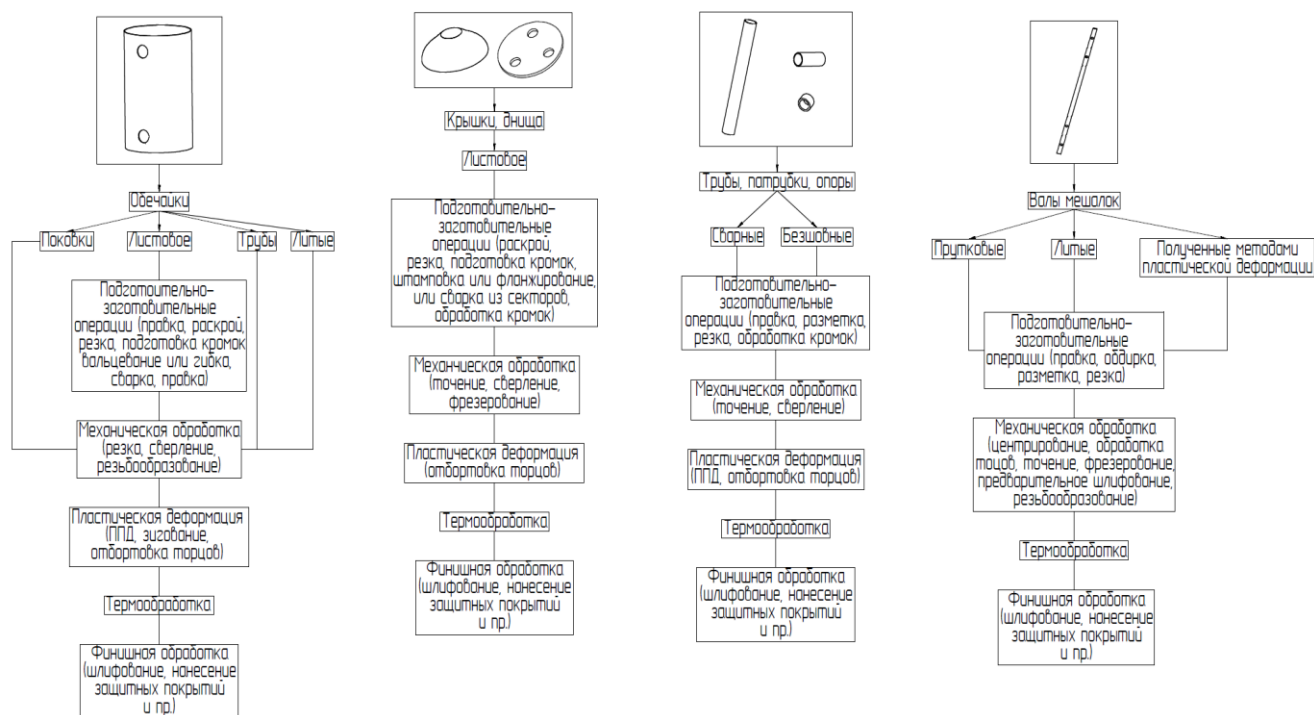


Рисунок 13 – Технология изготовления деталей реакторных агрегатов

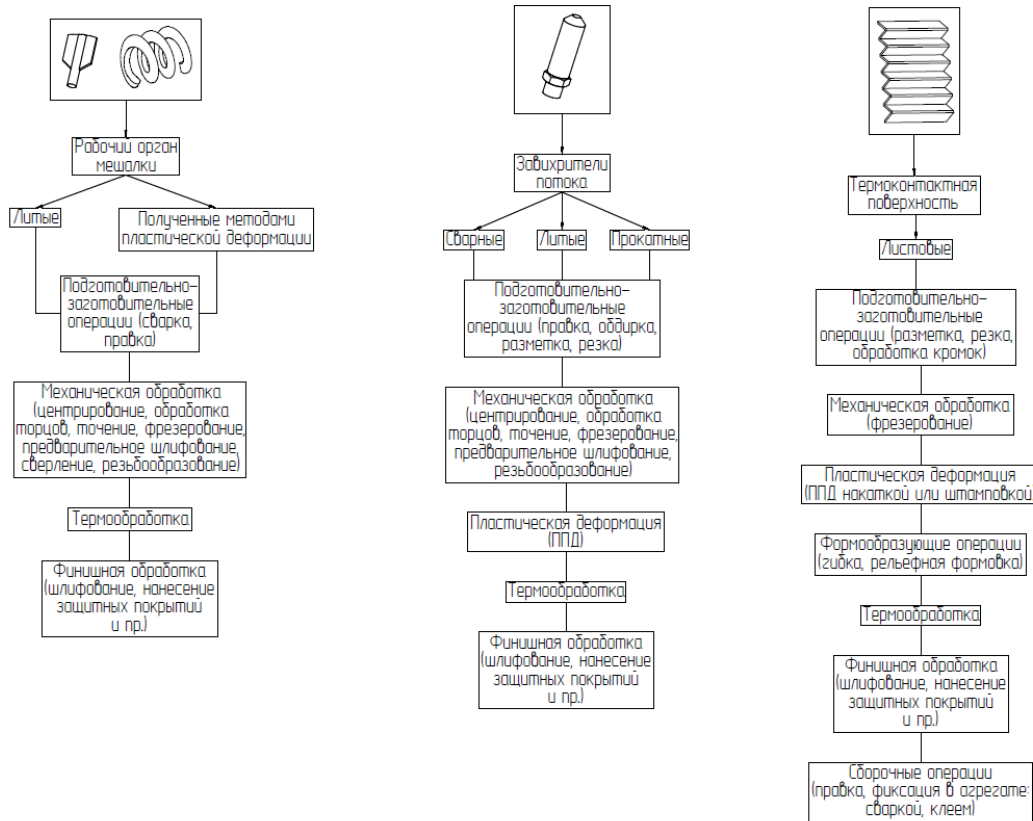


Рисунок 14 – Технология изготовления деталей реакторных систем (продолжение)

Основные исследования по разработке и совершенствованию технологий изготовления деталей теплообменных систем в нашей стране выполнены Р.Г. Ризвановым, С.В. Паршиным, Р.В. Гуровым, А.И. Ремневым, М.З. Зариповым, Г.В. Шимовым и др. [53–58].

За рубежом ведущими странами по исследованию и производству теплообменных агрегатов являются Германия, Италия, Южная Корея и Китай.

1.2 Проблема формирования термоконтактных поверхностей и технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик реакторных агрегатов

Как отмечают авторы многих исследований в данном направлении [59–61], к основным недостаткам утилизирующих реакторных агрегатов относятся высокие материальные и/или энергетические затраты, ввиду этого работа таких реакторов в данный момент времени является нестабильной. Наиболее эффективные способы

борьбы с данными недостатками, по мнению автора настоящей работы и многих представителей научного сообщества, можно разделить на две основные категории:

1. Разработка качественной с точки зрения затрат на производство и эксплуатацию и безопасной конструкции реакторных агрегатов.
2. Совершенствование существующих реакторных систем путем разработки эффективных устройств термодинамического воздействия (интенсификаторы, перемешивающие устройства) с целью обеспечения интенсификации теплообмена, что позволит повысить конверсию и селективность процесса.

Как было отмечено ранее, сегодня существует большое разнообразие конструкций утилизирующих реакторных агрегатов, предназначенных для переработки углеводородных отходов. Одним из путей повышения их эффективности и производительности является применение устройств термодинамического воздействия. При этом данные устройства должны являться одновременно частью реакторного агрегата и интенсификатором теплообменных процессов. С целью разработки технологии модернизации реакторных агрегатов необходимо провести анализ существующих технологий изготовления устройств для интенсификации теплообмена. В качестве таких устройств наибольшее внимание уделяется устройствам, принцип действия которых основан на пассивных методах интенсификации. В результате их действия нет необходимости в подводе дополнительной энергии для их работоспособности. Все известные пассивные методы интенсификации можно разделить на следующие три класса:

1. Применение турбулизирующих вставок.
2. Использование дискретно-шероховатых, или термоконттактных, поверхностей с выступами и впадинами.
3. Иные методы интенсификации.

Местонахождение устройств пассивной интенсификации можно продемонстрировать на примере реакторного агрегата типа «труба в трубе» (рисунок 15). Расположение их в канале (внутреннем корпусе) с теплоносителем

позволит интенсифицировать процесс теплообмена за счет увеличения контактной площади и турбулизации потока.

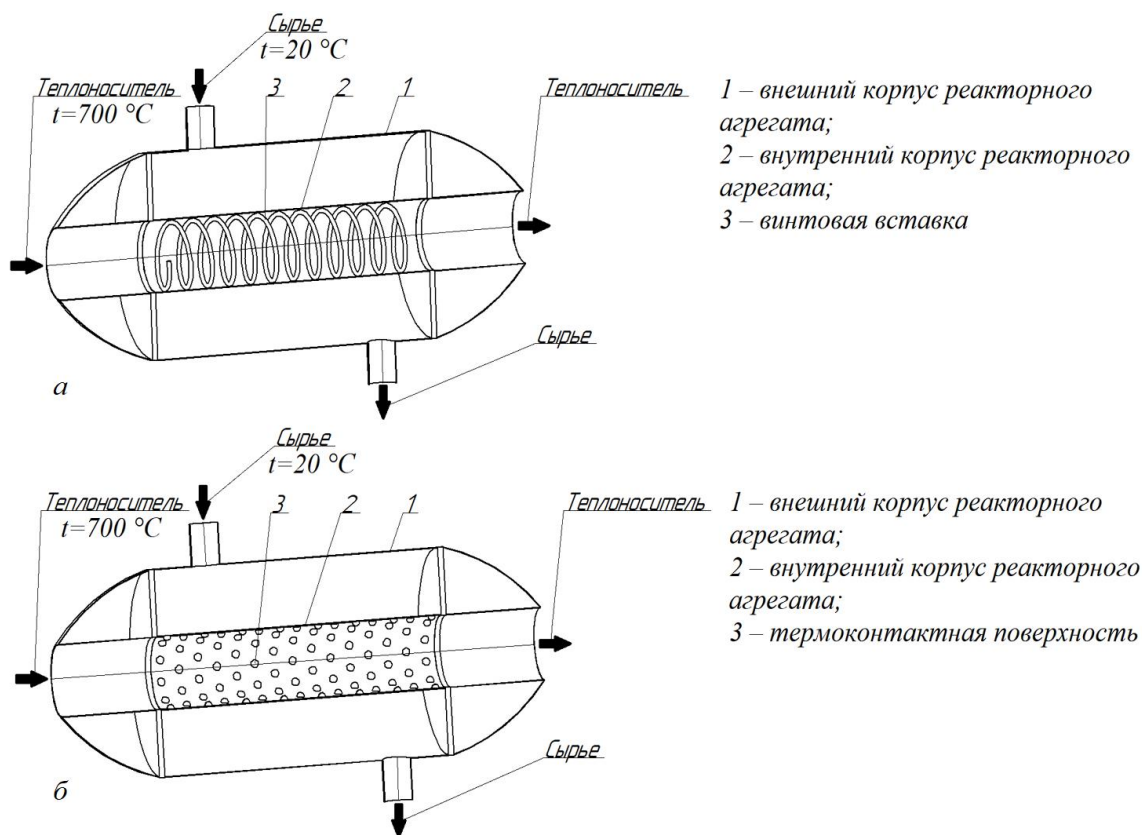


Рисунок 15 – Реакторные агрегаты с интенсификаторами теплообмена:

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

1.2.1 Турбулизирующие вставки

Турбулизирующие вставки представляют собой устройства, направленные на улучшение гидродинамических показателей жидкостей и газа в напорном канале. Жидкость или газ, контактируя с поверхностью вставки, образует турбулентное движение, тем самым усиливая теплообмен между взаимодействующими средами. Наиболее часто встречаются спиральные проволочные, витые ленточные, шнековые, диафрагменные, кресто- и звездообразные вставки [62, 63]. Спиральные проволочные вставки изготавливают с помощью навивки ручным или автоматическим способом на специальных

станках, витые ленточные – путем навивки либо пластической деформации металла (рисунок 16) [64].

Что касается шнековых, диафрагменных, кресто- и звездообразных вставок, то тут есть два способа их изготовления. Первым является обработка поковок или пруткового проката на токарном и фрезерном станках с последующей термической и электрохимической обработкой, в результате чего образуется единая конструкция. Второй способ заключается в раскрое витков (диафрагм, крестов и звездочек) с последующей их гибкой (если требуется) и приваркой к основанию вставки, выполненной в виде пруткового или трубного проката (рисунок 17). Для шнековой вставки также характерно изготовление формообразующих спиралей методом навивки или прокатки [65–66]. Основным недостатком таких конструкций турбулизаторов является высокая металлоемкость.

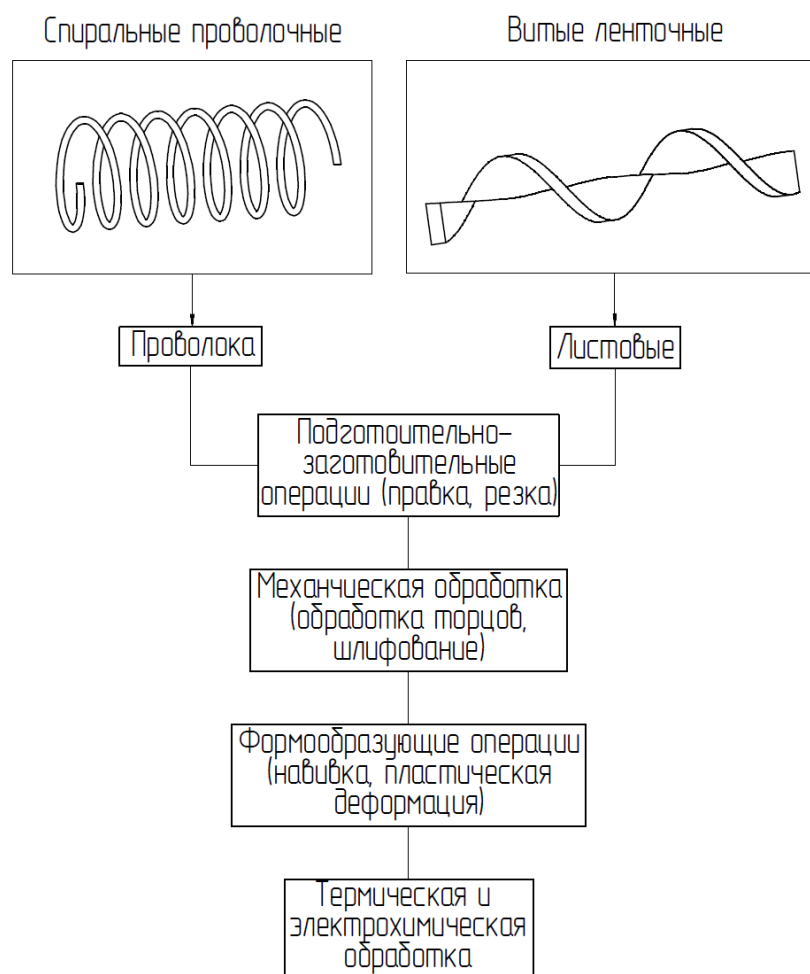


Рисунок 16 – Технология изготовления спиральных проволочных и витых ленточных вставок

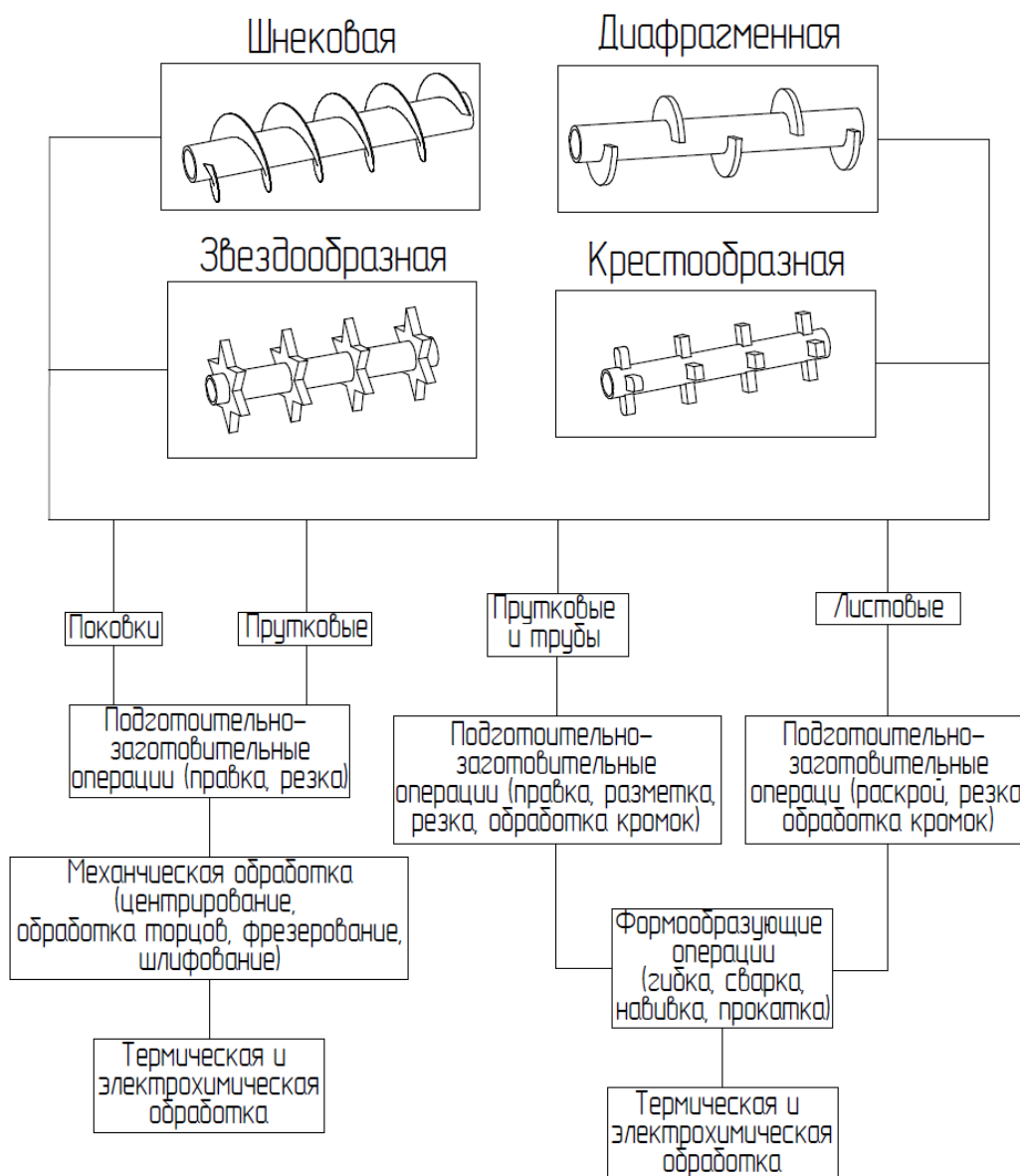


Рисунок 17 – Технология изготовления шнековых, диафрагменных, звездо- и крестообразных вставок

1.2.2 Дискретно-шероховатые, или термоконттактные, поверхности

Дискретно-шероховатые поверхности представляют собой выступы и впадины различной геометрической формы на внутренней поверхности каналов и труб. Передача тепла в трубах и канала происходит путем контакта теплоносителя с дискретно-шероховатой поверхностью, где на границе их соприкосновения происходит тепловой контакт. Ввиду этого целесообразно называть все поверхности, имеющие прямой контакт с теплоносителем, термоконттактными

поверхностями, различающимися лишь наличием или отсутствием выступов и впадин.

Чаще всего для образования термоконтактных поверхностей используют трубы различного диаметра и длины. Благодаря такому исполнению интенсификация теплообмена достигается как снаружи, так и внутри трубного пространства. В отличие от турбулизирующих вставок термоконтактные поверхности могут выполняться непосредственно на корпусах технологических реакторов, что позволяет упростить технологию их изготовления и сэкономить на создании металлоемких устройств [51–70].

К каналам с термоконтактной поверхностью с выступами и впадинами относятся [71–74]:

- периодически расположенные, поперечные, плавно очерченные выступы (например, кольцевая накатка);
- одно- и многозаходные выступы с плавным очертанием (например, винтовая кольцевая или спиральная треугольная накатка), винтовые пристенные оребрения (винтообразно закрученные трубы);
- периодически расположенные поперечные прямоугольные или квадратные оребрения;
- одно- и многозаходные прямоугольные или квадратные канавки, винтовые оребрения, а также проволочные спиральные оребрения.

Как известно, технология накатки выступов является наиболее простой и обладает рядом преимуществ по сравнению с другими конструкциями интенсификаторов:

1. Образующиеся на наружной поверхности трубы (канала) канавки также интенсифицируют теплообмен (как и выступы на внутренней).
2. Технология сборки большинства теплообменных агрегатов целиком применима для накатанных труб.

Минусом такой технологии является невозможность формирования термоконтактной поверхности на трубах большого диаметра и толщины.

Общий вид поперечной кольцевой, винтовой накатки и винтообразно закрученных труб, а также технология их изготовления представлены на рисунке 18. На трубах малой толщины (менее 1 мм) формирование контактных поверхностей (каверн и «выпучек») может осуществляться на токарном станке с помощью формообразующих бойков. Для более толстых труб применяются штампы для ударно-деформационного формирования неровностей (рисунок 19). Формирование винтовой, спиральной накатки и винтообразно закрученных труб осуществляют на станках с роликовым блоком (рисунок 20), с регулировкой по шагу и глубине канавок [75–78].

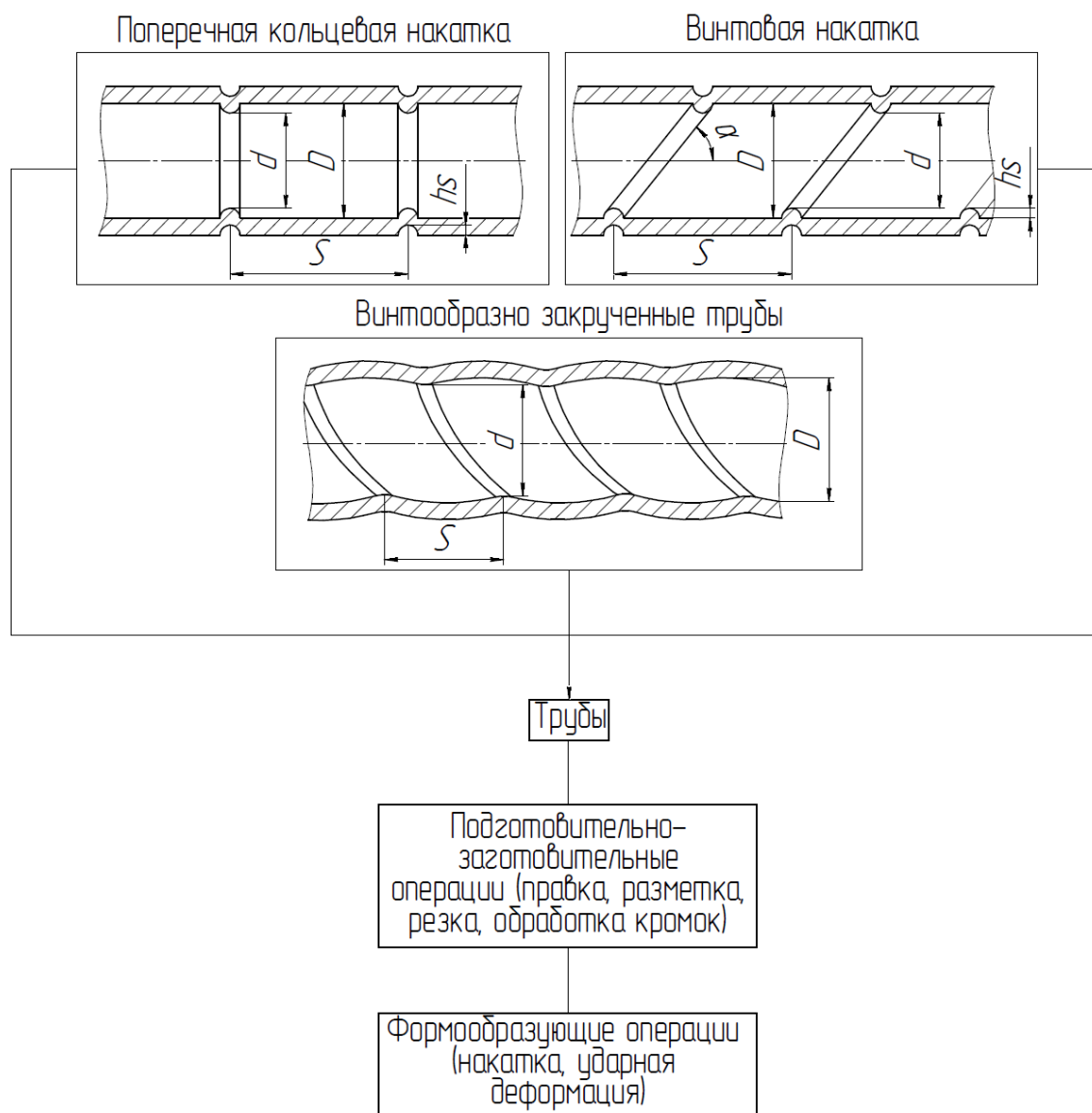


Рисунок 18 – Технология изготовления поперечной кольцевой, винтовой накатки и винтообразно закрученных труб

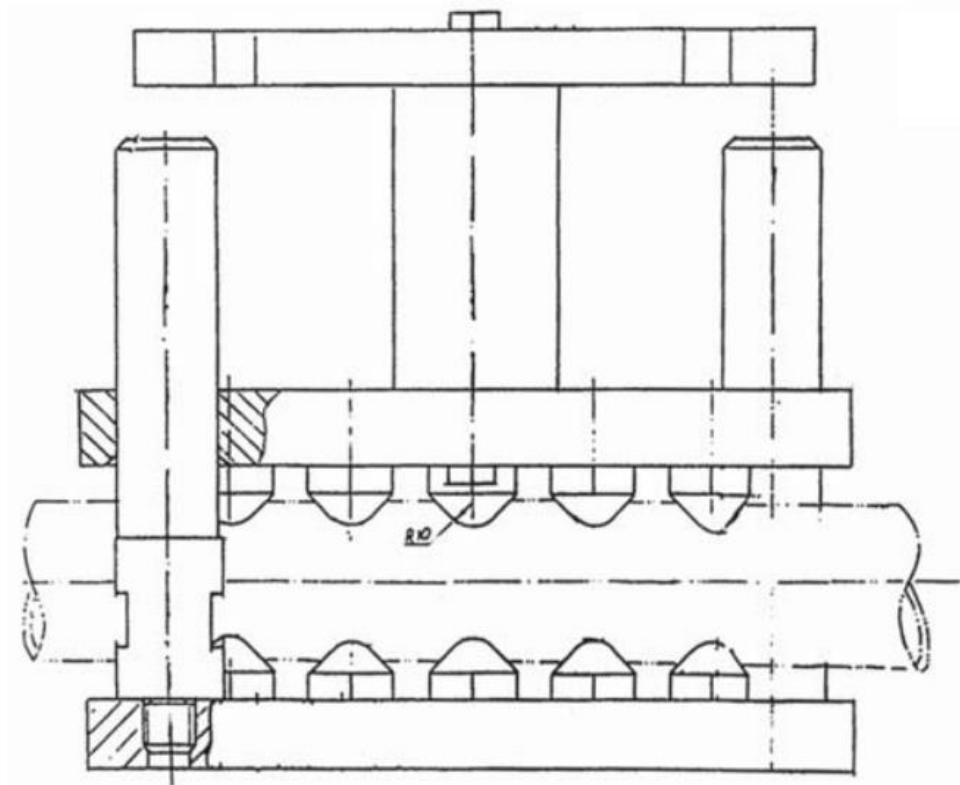


Рисунок 19 – Штамп для формирования толстостенных труб с энергоэффективными поверхностями теплообмена [75]

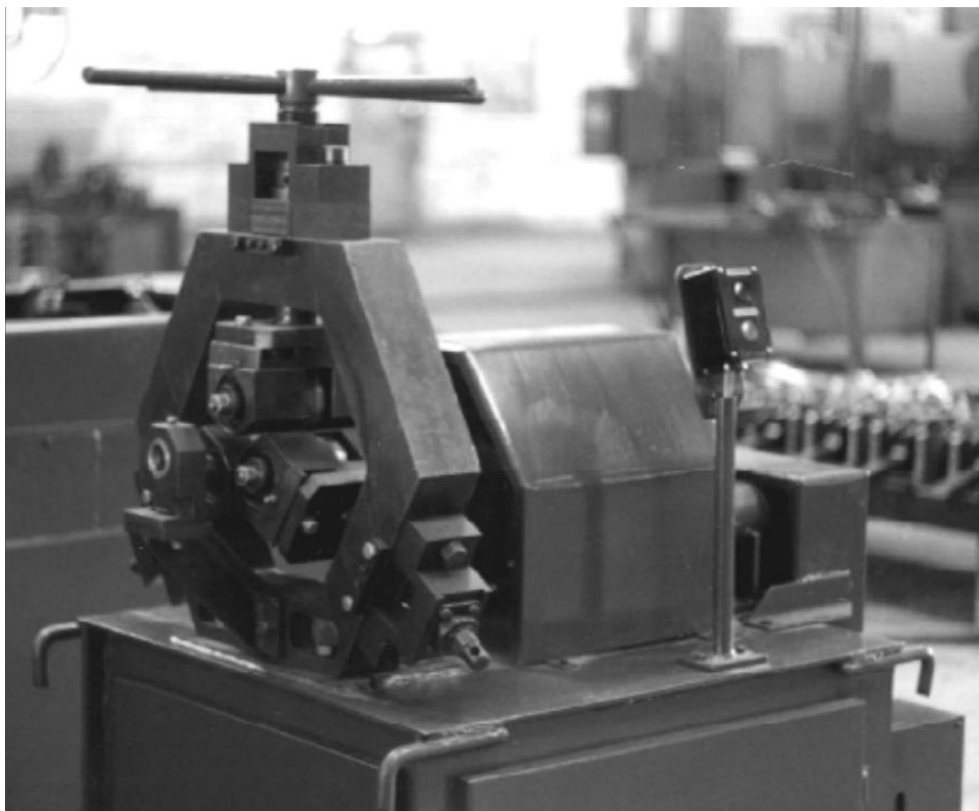


Рисунок 20 – Внешний вид устройства для накатки спиральных канавок [76]

Технологию изготовления труб и каналов с внутренним оребрением можно разделить на следующие несколько типов [79–86]:

- резание: заключается в образовании поверхности с определенным геометрическим профилем с помощью режущего инструмента. Является наиболее точным способом изготовления внутренней термодетальной поверхности с развитой геометрией, но требует достаточно длительного времени образования и необходимости применения специального режущего инструмента;

- дорнирование: заключается в протягивании через канал дорна с определенным геометрическим профилем (рисунок 21). Недостатком технологии является сложность подбора термических режимов;

- ротационная ковка: позволяет получать трубы и каналы с хорошей внутренней поверхностью и относительно неплохой точностью (рисунок 8). Недостатком данного способа является высокая стоимость оборудования;

- протяжка: осуществляется с помощью режущего инструмента с определенным профилем (рисунок 22), который протягивают на специальном прессе через канал, получая нужную геометрическую форму внутреннего канала. Недостатками являются необходимость использования дорогостоящего оборудования и ограниченность применения (для тонкостенных труб);

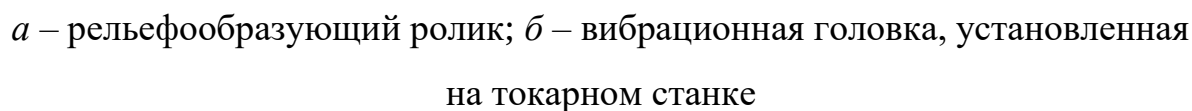
- волочение: сущность технологии заключается в волочении труб с одновременным их скручиванием на определенный шаг спирали с получением таким образом внутреннего или наружного оребрения поверхности. Как и в случае с протяжкой, процесс характеризуется высокими затратами и ограниченностью применения;

- электрохимическое травление: заключается во внесении электрода с определённым геометрическим профилем в полость канала с последующей подачей электрического тока, тем самым вытравливается металл до достижения нужного оребрения. Способ характеризуется своей быстротой, но применим к ограниченному числу материалов;

- накатывание или вибронакатывание: осуществляется с помощью рельефообразующих роликов и вибрационных головок (рисунок 23). Недостаток



a – процесс дорнирования; b – устройство для ротационной ковки



Протяжка, волочение и дорнирование наиболее применимы для образования внутреннего винтового оребрения, остальные технологии более универсальны в отношении формообразования различной геометрии. Технология изготовления труб и каналов с внутренним оребрением представлена на рисунке 24.

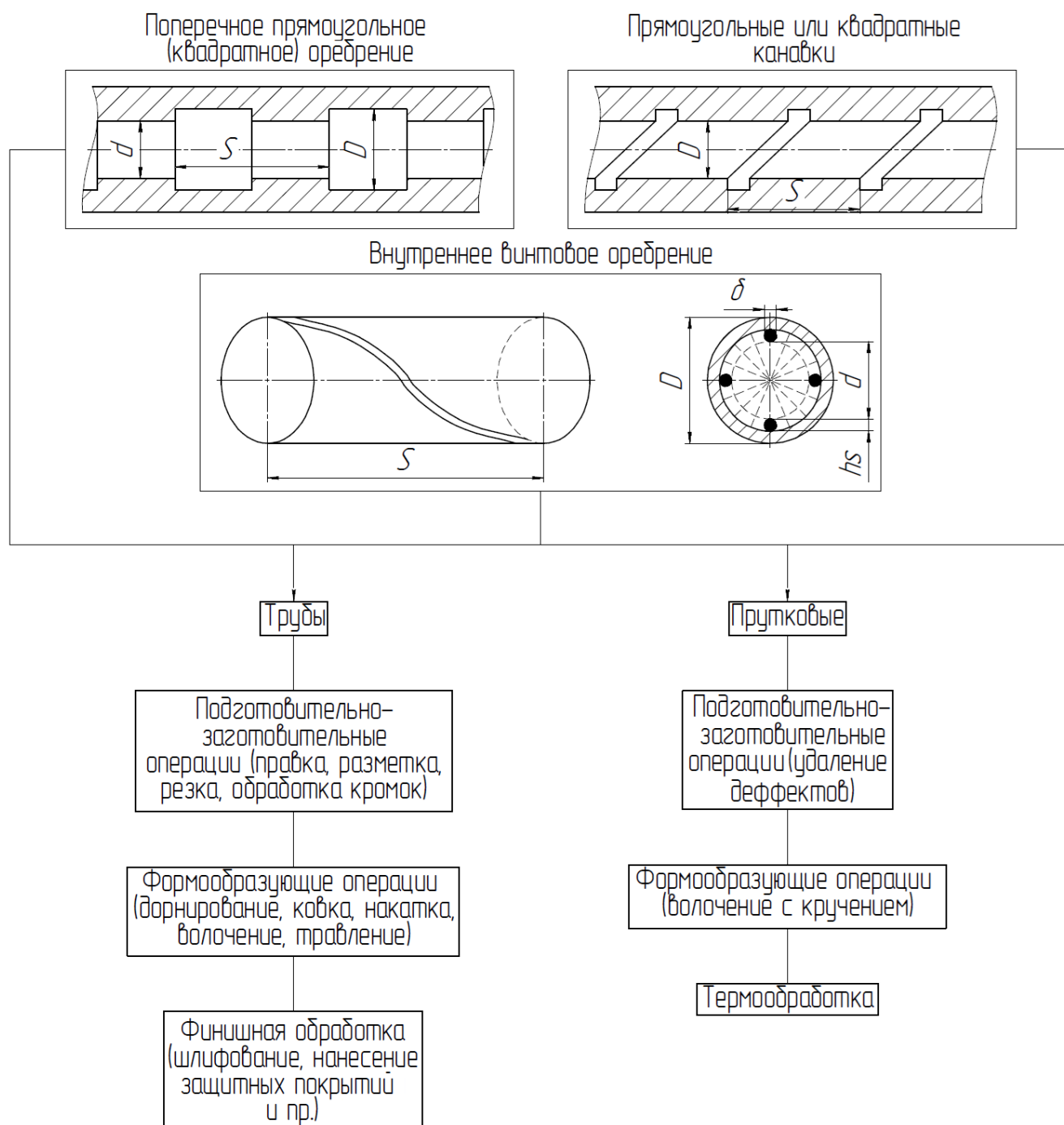


Рисунок 24 – Технология оребрения внутренней поверхности труб и каналов различными способами

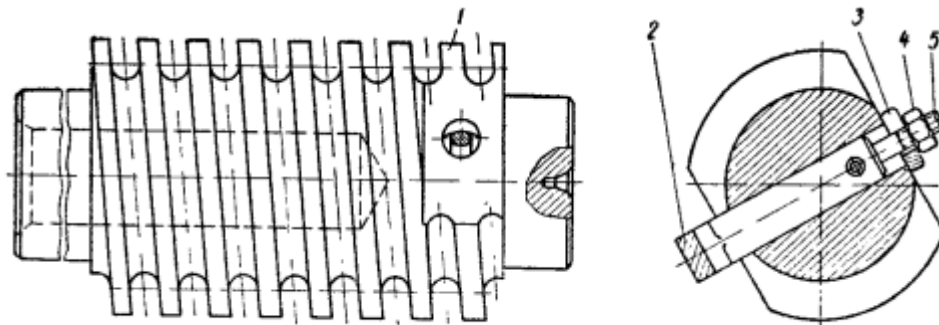
1.2.3 Иные методы интенсификации

К наиболее распространенным иным методам интенсификации теплообменных процессов относятся изготовление змеевиковых труб, а также изготовление внешней оребренной поверхности каналов и корпусов.

Змеевиковые трубы нашли свое применение в различных реакционных аппаратах, испарителях, трубчатых печах, резервуарах и др. Достаточно широкая область их применения обусловлена способностью работать при значительных давлениях, а также интенсифицировать теплообмен за счет возникающих центробежных эффектов внутри трубного пространства [87–88].

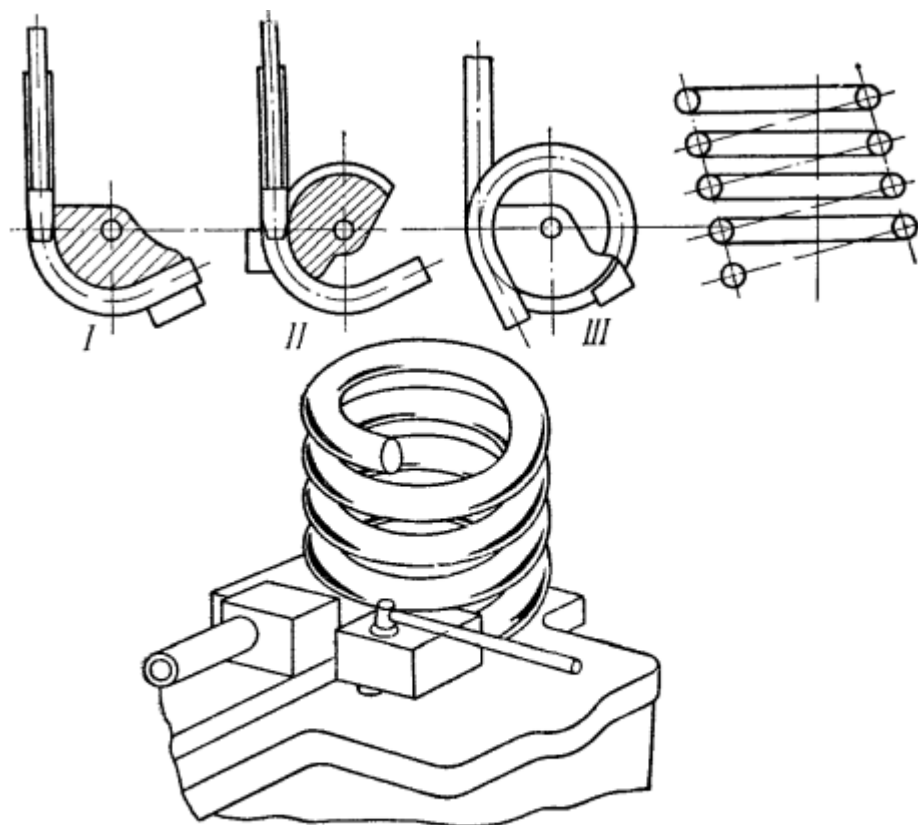
Змеевиковые трубы изготавливают с помощью гибки несколькими способами. Трубы небольшого диаметра из стали, а также красномедные и алюминиевые трубы могут быть выполнены на токарном станке с применением оправки (рисунок 25). Трубы большего диаметра изготавливают на универсальных трубогибочных станках с оснасткой в виде гибочного ролика и специальных сменных прижимов (рисунок 26). Еще одним способом гибки является индукционная гибка, заключающаяся в одновременном воздействии на изгибаемую область теплового эффекта магнитного поля от индуктора и механического усилия прижимного ролика [89]. При этом изготовление таких труб может быть выполнено двумя технологическими вариантами (рисунок 27):

1. Гибка части трубы (патрубка) с последующей их сваркой в целую трубу.
2. Сварка трубной заготовки «в плетъ» с последующей ее гибкой.



1 — оправка, 2 — костыль, 3 — шайба, 4 — гайка, 5 — шпилька.

Рисунок 25 – Приспособление для навивки змеевика на токарном станке [89]



I — гибка части правого витка на угол 120° .

II — гибка части змеевика еще на 120° .

III — момент, когда змеевик согнут на полный виток.

Рисунок 26 – Схема гибки цилиндрических змеевиков на универсальных дорновых станках [89]

В промышленных установках с высокими температурными режимами целесообразно изготавливать змеевиковые трубы литьем жаропрочных сталей и сплавов, что объясняется особенностью структуры данных сталей и повышенным содержанием углерода в них. Калачи для соединения отдельных труб изготавливаются с помощью статистического литья, а наиболее жаропрочные трубы – центробежной отливкой (рисунок 27) [90]. Недостатками исполнения аппаратов с применением теплообменных труб заключаются в их громоздкости, высокой металлоемкости, а также затруднении их обслуживания (очистка трубного и межтрубного пространства).

Змеевиковые трубы

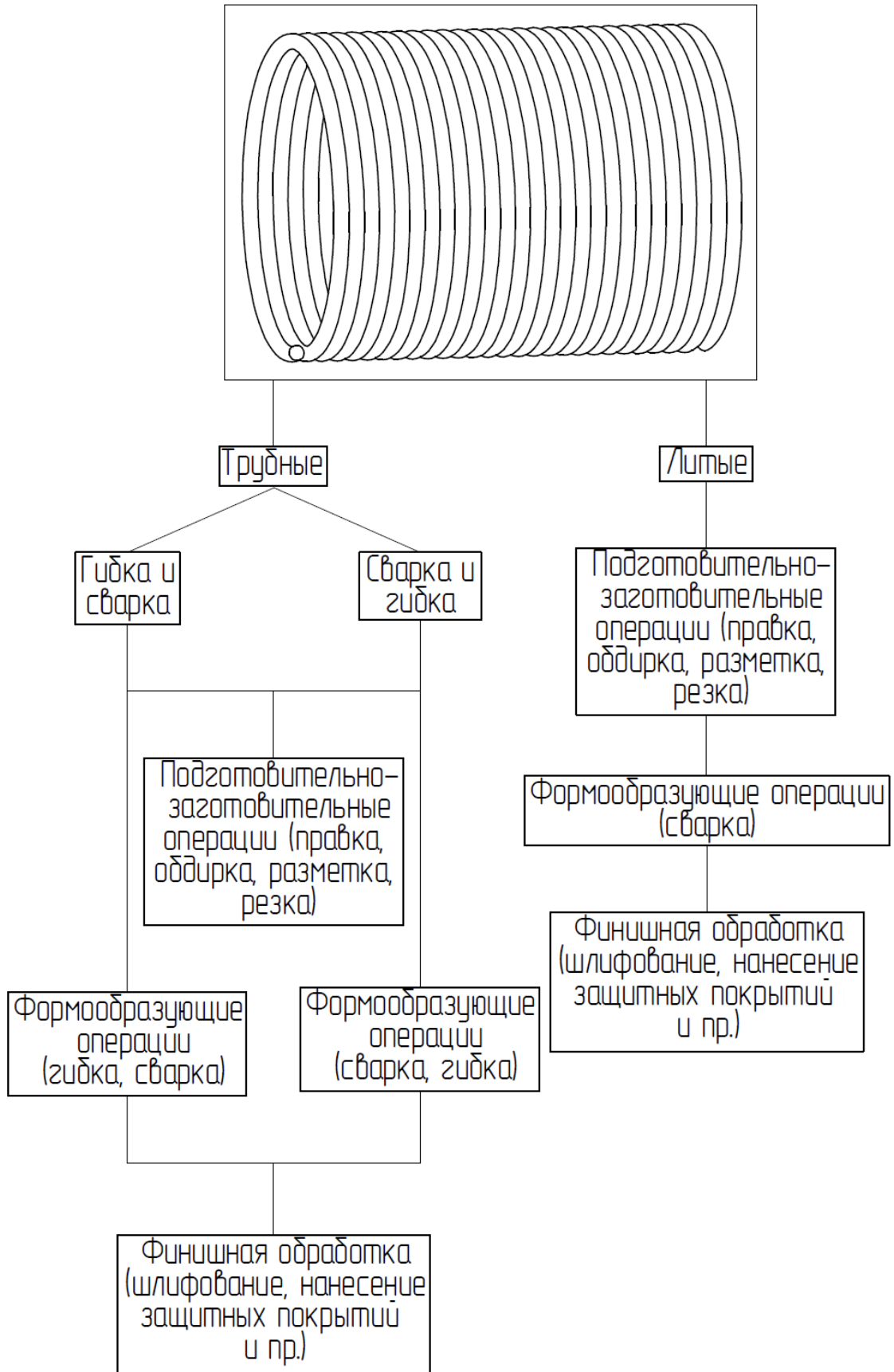
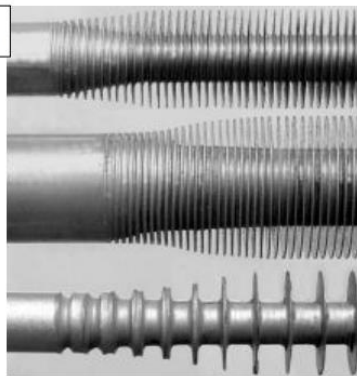


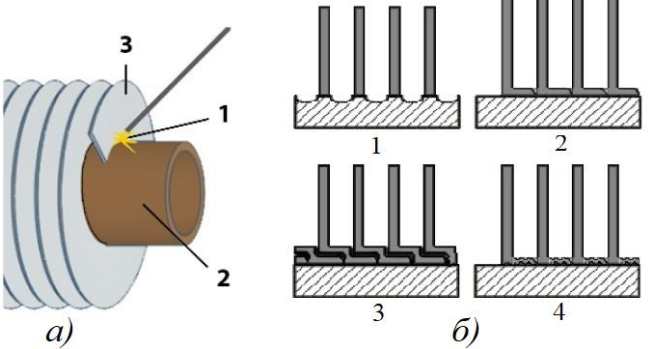
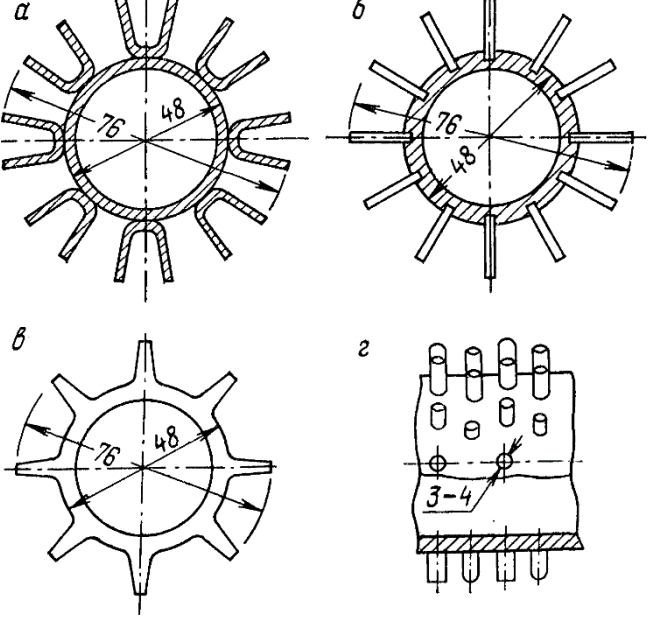
Рисунок 27 – Технология изготовления змеевиковых труб

Оребренные трубы и каналы (оребрение теплоотдающей стенки) используют для нагрева, конденсации и охлаждения различных сред. Особенностью технологии оребрения является то, что применение ребер на поверхности труб обеспечивает максимальное увеличение теплообмена. Сегодня можно выделить пять основных методов оребрения труб: накатка, поперечное (спиральное) оребрение, метод продольного оребрения, обжим и метод ТВЧ (токи высокой частоты). Характеристика каждого метода представлена в таблице 1. Хотя способ оребрения труб и является высокопроизводительным, обеспечивающим хорошую интенсификацию теплообмена, тем не менее у данного метода есть недостатки, заключающиеся в невозможности его использования при высоких температурах (свыше 400 °С), а также засорении контактных поверхностей (ребер, пластин), в результате чего возникает ухудшение теплотехнических свойств.

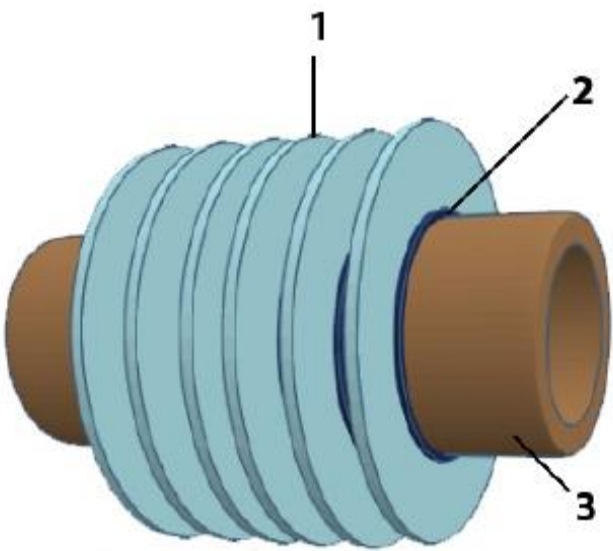
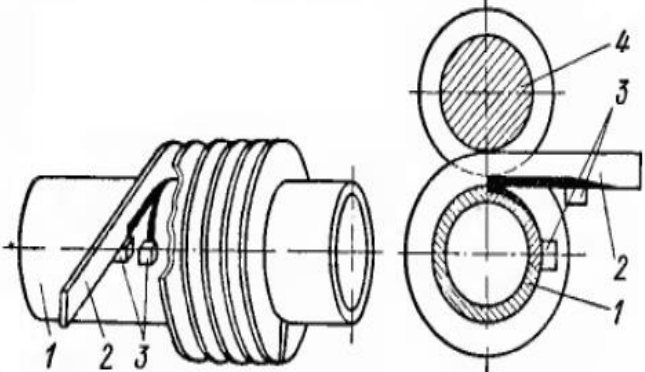
Таблица 1 – Характеристика методов оребрения труб и каналов

Метод	Характеристика метода	Иллюстрация метода
Накатка	Является одним из самых старых и хорошо освоенных методов. В основе данного метода лежит процесс пластического деформирования металла. При накатывании используются три валька-калибра, расположенные на оправке под углом 120° относительно несущей трубы [91–92]	а  б  Процесс изготовления оребренных труб накаткой: а – формирование ребер вальками на несущей трубе; б – варианты оребрения труб [92]

Продолжение таблицы 1

Метод	Характеристика метода	Иллюстрация метода
Поперечное оребрение	Ребристые элементы наносятся на несущую конструкцию (трубу) поперечно (набором отдельных элементов, навивкой и др.). Фиксация ребер осуществляется сваркой, пайкой либо деформированием [93–94]	 Поперечное оребрение труб: <i>а</i> – сваркой: 1 – подача электрода; 2 – несущая труба; 3 – ребро; <i>б</i> – деформацией: 1 – прессование в пазы; 2 – за счет прижимной силы; 3 – внахлест; 4 – с насечками в местах крепления [93–94]
Продольное оребрение	Ребристые элементы (ребра, пластины) наносятся на несущую конструкцию. В отличие от поперечного оребрения элементы наносятся продольно и выполняются прокаткой, вытяжкой из расплава или сваркой [93]	 Продольное оребрение труб: <i>а</i> – корытообразные приварные ребра; <i>б</i> – завальцованные ребра; <i>в</i> – выдавленные ребра; <i>г</i> – шиповидные приварные ребра [95]

Окончание таблицы 1

Метод	Характеристика метода	Иллюстрация метода
Обжим	Метод заключается в фиксации шайб (ребер) с помощью воротника, расположенного между шайбой и несущей трубой [94]	 Оребренный теплообменник обжимом шайб (ребер): 1 – шайба; 2 – обжимной воротник шайбы; 3 – несущая труба [94]
ТВЧ	При поступательно-вращательном движении несущей трубы на ее поверхность подается лента, которая поджимается к трубе специальными роликами. В зоне контакта трубы и ленты подводятся электроды, которые плавят их и при одновременно прижиге – сварке [94]	 Изготовление трубы со спиральным ребром: 1 – несущая труба; 2 – лента; 3 – скользящие контакты; 4 – ролик [94]

Существуют также наиболее универсальные термодинамические устройства, технология изготовления которых позволяет образовывать развитую термоконтактную поверхность не только на трубчатые элементы цилиндрической формы, но и на поверхности теплообмена иной геометрической формы (овальной, прямоугольной, квадратной и др.).

Предложенный авторами работы [96] способ получения развитой штырьковой поверхности теплообмена основан на технологии подрезания и

отгибке поверхности слоев заготовки. При этом подрезание осуществляется в два прохода. На первом проходе выбирается угол отгибки материала, который либо меньше, либо равный углу подрезания. На втором проходе осуществляется подрезание в направлении, противоположном наклону ребер, которые были получены при первом проходе (рисунок 28).

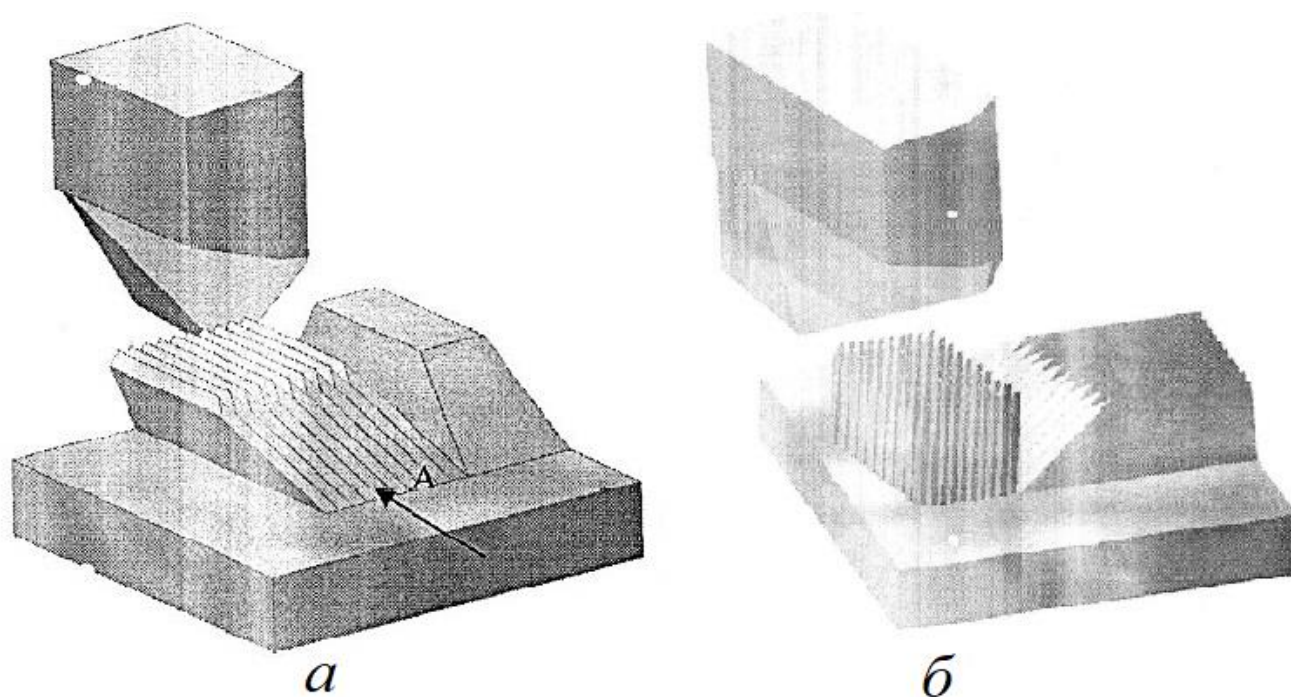


Рисунок 28 – Получение развитой штырьковой теплообменной поверхности:

а – схема первого прохода инструмента; *б* – схема второго прохода инструмента [96]

Другой способ изготовления теплообменного элемента предназначен для применения в трубчатых элементах [97]. Сущность способа заключается в изготовлении плоской трубы с внутренним оребрением с последующим отгибанием ребер. При этом отгибание осуществляется при постоянном угле наклона, а также со скоростью подрезания режущим инструментом, выполненным с вращающимся на нем роликом (рисунок 29).

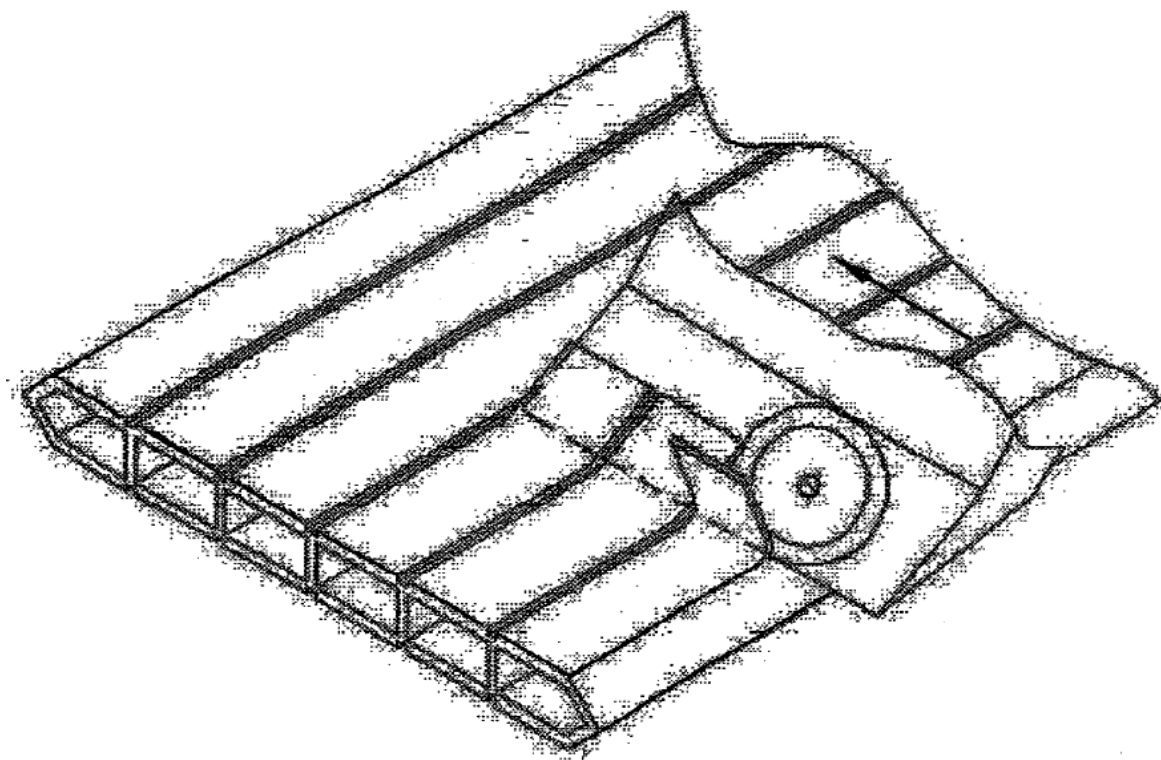


Рисунок 29 – Схема подрезания на поверхности теплообменника
(аксонометрия) [97]

Сегодня имеется большое многообразие технических решений, основанных на подрезании поверхности слоев заготовки. Выше были представлены некоторые из них. Общими недостатками получения теплообменной (термоконтактной) поверхности семейством данных способов являются образование ворсистости лепестковых ребер в результате их подрезания, необходимость изготовления специального режущего инструмента, деформация лепестков при воздействии высоких температур, а также трудоемкость проведения очистных мероприятий.

Известен теплообменный элемент и способ его изготовления [98]. Способ изготовления теплообменного элемента заключается в получении трубы методом гибки из полосы в виде двух симметричных половин с продольными ребрами. Соединение половин осуществляется с помощью сварки по ребрам. Внутри трубы также устанавливается выполненный в виде волны турбулизатор (рисунок 30). При этом труба может быть выполнена в различных конфигурациях: овальной, ромбической, прямоугольной и т.д.

По сути, представленный способ является комбинацией различных методов интенсификации теплообмена. Недостатком данного технического решения являются низкая интенсивность теплообмена, обусловленная ограниченным количеством ребер, а также возникающие коробление и прожог при сварке ребер.

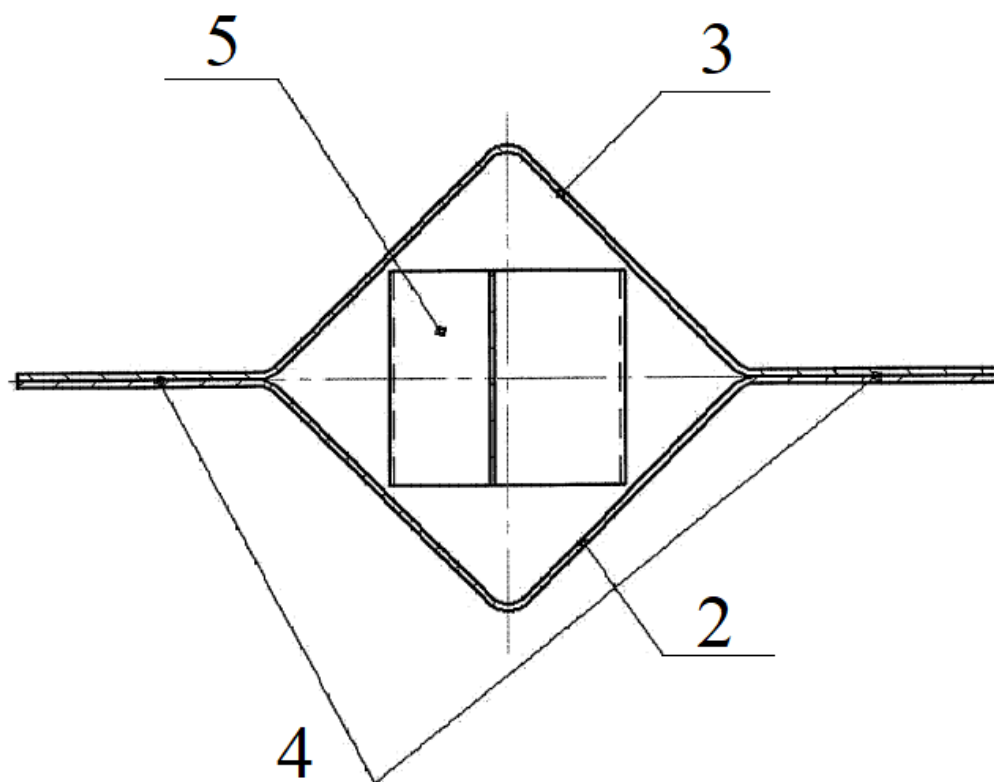


Рисунок 30 – Теплообменный элемент в разрезе:

1 – труба (на рисунке не показана), состоящая из двух половин 2 и 3; 2, 3 – симметричные половины; 4 – плавниковые ребра; 5 – турбулизатор [98]

Следующий способ заключается в изготовлении труб с внутренним, а при желании внешним оребрением [99], представляющих собой одно- или многоуровневую конструкцию «труба в трубе». Согласно данному техническому решению ребра прикрепляют ко внешней стороне опорного элемента (трубы) с помощью сварки. Затем поверх данной конструкции устанавливают трубу большего диаметра и направляют в индукционную печь для соединения частей внешней трубы с внутренней (опорной). При этом на ребра опорного элемента наносится связующий материал (например, медь), а для обеспечения плотного

контакта внутренней и внешней трубы может быть использована оправка путем ее протягивания. Кроме того, для соединения частей конструкции может быть использовано горелочное устройство. Этапы изготовления трубы с внутренним оребрением изображены на рисунке 31. Представленный способ, несмотря на свой возраст, не получил широкого применения в промышленности, ввиду наличия множество ребер, снижающих скорость потока и, как следствие, интенсификацию. Кроме того, со временем происходит накопление отложений в межтрубном пространстве, что снижает эффективность работы устройства.

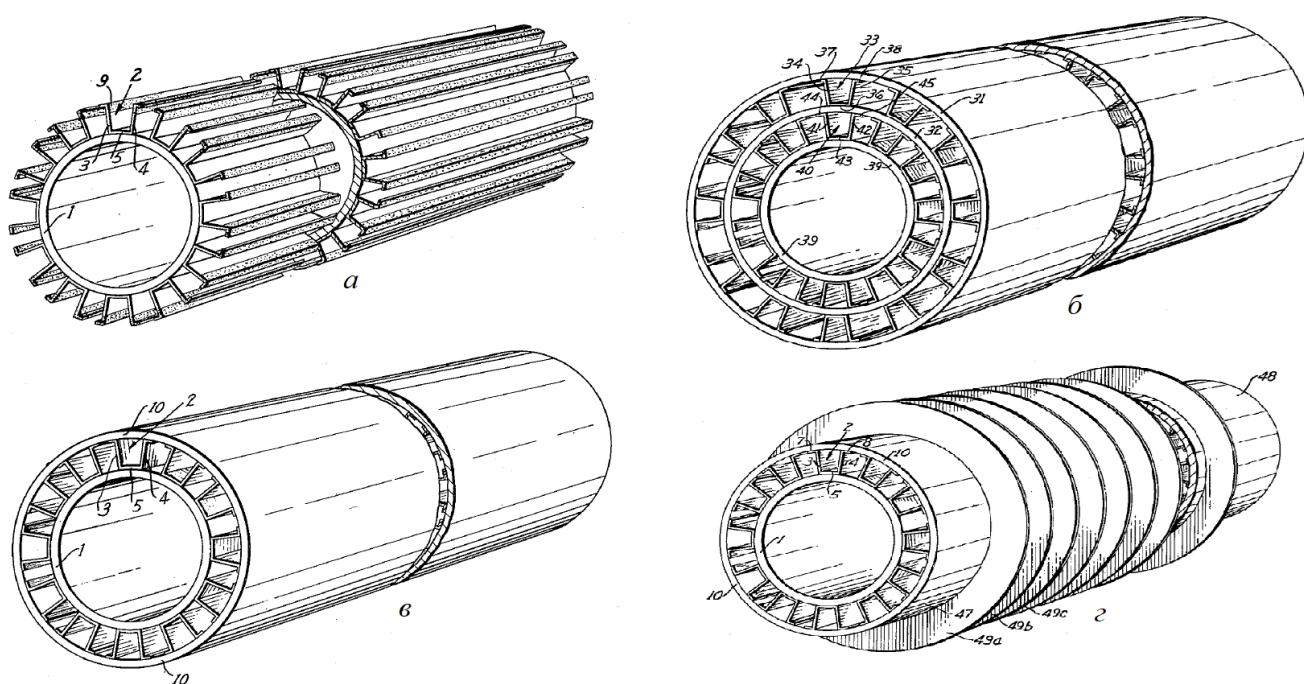


Рисунок 31 – Этапы изготовления трубы с внутренним оребрением:

а – нанесение ребер на опорную трубу; *б* – соединение внутренней и внешней трубы; *в* – формирование многоуровневой конструкции; *г* – нанесение на внешнюю поверхность трубы с внутренним оребрением ребер в форме колец [99]

Последнее из рассматриваемых технических решений представляет собой устройство для изготовления теплообменных элементов [100]. Сущность изобретения заключается в нанесении на основные части металлического листа ребер с помощью непрерывного процесса. Поперечное сечение основной части листа имеет большую ширину по отношению к высоте. Ребра образуются из

листов, сматываемых с барабанов и получающих в профилирующих устройствах складчатую или волокнистую поверхность, затем фиксируются на ширинах сторон основной части листа и привариваются. Нанесение профилированных ребристых листов и их фиксация осуществляются посредством приводного устройства. Для сварки предпочтительно применять лазерные головки. Все операции происходят в автоматическом режиме с помощью устройства, представленного на рисунке 32. Дальнейшие примеры исполнения теплообменных элементов приведены на рисунке 33. Данный способ характеризуется такими недостатками, как многослойное «сэндвич»-соединение основания и ребристых листов, при котором происходит снижение интенсивности теплообмена, а также применение лазерной сварки ввиду ее дороговизны. К тому же изготовление профилирующих барабанов под каждый конкретный случай приводит к удорожанию изготовления готового продукта.

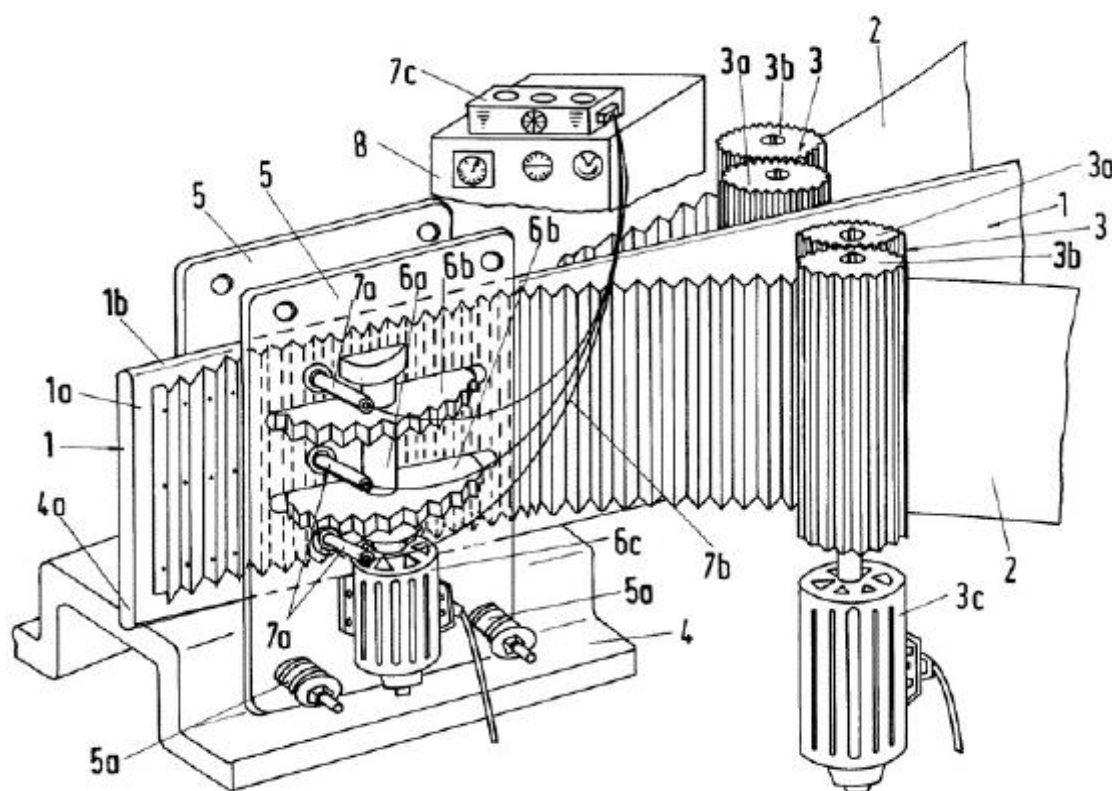


Рисунок 32 – Перспективное изображение предлагаемого устройства для осуществления предложенного способа изготовления теплообменных элементов [100]

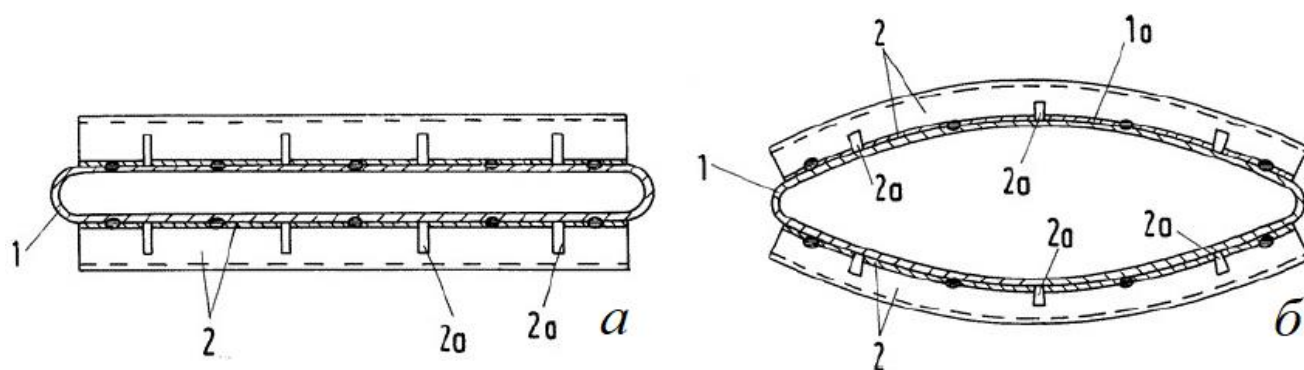


Рисунок 33 – Возможные исполнения теплообменного элемента:

а – ребристые листы 2 снабжены полученными штамповкой вырезами 2а;

б – основная часть 1 с эллиптическим поперечным сечением [100]

В данном параграфе была представлена классификация существующих реакторных агрегатов, определены их отличительные черты и недостатки, рассмотрены пассивные методы интенсификации и технологии изготовления интенсификаторов теплообмена, которые могут быть использованы в реакторных агрегатах. Путем анализа было установлено, что для повышения эффективности и производительности процесса термической деструкции в реакторных агрегатах чаще всего используют различные интенсифицирующие устройства или выполняют их таким образом, чтобы площадь контакта углеводородных отходов с теплоносителем была максимальной. Также было установлено, что образование термоконтактных поверхностей с помощью накатки является наиболее востребованным методом на производстве ввиду своих преимуществ. Кроме того, интенсификаторы теплообмена, выполненные накаткой, в отличие от теплообменных устройств с внешними ребрами, способны выдерживать наиболее высокие температуры (от 400 °С и выше). В сравнении с турбулизаторами теплообмена можно отметить менее затратное производство, снижающее себестоимость, и массогабаритные характеристики реакторного оборудования. Хотя накатка является давно отработанной технологией у нее есть недостаток, заключающийся в ограниченности применения только на трубы, каналы и корпуса малого диаметра и толщины преимущественно цилиндрической формы, что не позволяет разрабатывать теплообменные поверхности иной формы.

1.3 Постановка цели и задач исследования

Целью настоящей работы является повышение производительности технологических процессов термической деструкции на основе формирования сфероидальных выступов на внутренней термоконтактной поверхности реакторного агрегата.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи исследования:

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

- провести имитационное математическое моделирование в программном комплексе COMSOL Multiphysics реакторного агрегата с модифицированной термоконтактной 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 термоконтактной поверхности на выход продуктов термической деструкции на основе натурных экспериментов;

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

1.4 Выводы

1. Основное направление модификации утилизирующих реакторных агрегатов заключается в стремлении увеличить их эффективность и производительность путем применения устройств, интенсифицирующих тепломассообменные процессы.

2. Большинство реакторных агрегатов представляет собой совокупность элементов, которые можно разделить на три основные группы: основные элементы корпуса, вспомогательные элементы (трубы, патрубки), устройства термодинамического воздействия (перемешивающие устройства, интенсификаторы). Разработка технологии изготовления и сборки элементов последней группы представляет собой практический интерес, так как позволяет повысить рабочие характеристики реакторных агрегатов без существенного изменения их конструкции.

3. Применение термоконтактных поверхностей является наиболее рентабельным способом интенсификации теплообмена в современных реакторных агрегатах. Хотя технология изготовления большинства термоконтактных поверхностей является простой и хорошо отработанной, тем не менее изготовление данных поверхностей на цилиндрических деталях большого диаметра и сложной геометрической формы характеризуется высокой трудоемкостью процесса.

4. Прочие методы интенсификации теплообмена заключаются в использовании змеевиковых, оребренных и комбинированных (оребранных в несколько слоев) труб. Эффективность применения змеевиковых труб ограничивается большой металлоемкостью и громоздкостью оборудования, оребренные трубы ограничены по температуре и среде применения, сложны в обслуживании. Среди прочих методов можно выделить методы формирования развитой теплообменной поверхности. Данные методы позволяют формировать термоконтактные поверхности на элементах оборудования, но характеризуются своей трудоемкостью.

2 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕРМОКОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ ВЛИЯНИЯ НА ТЕПЛООБМЕН

2.1 Обоснование необходимости совершенствования корпуса реакторного агрегата

С развитием производственных мощностей и требований, предъявляемых потребителем, теплообменным аппаратам уделяется всё большее внимание с точки зрения повышения качества их работы, в частности, повышения степени выхода готового продукта с сохранением его выходных характеристик [101]. Как частный вид промышленных установок разработаны технологические линии и реакторные агрегаты для термической деструкции углеводородных отходов [102]. Ключевой особенностью данных агрегатов является возможность утилизации отходов с одновременным получением полезных продуктов в виде углеводородных газов, жидких углеводородов, водорода и водородсодержащих смесей. Однако подобного рода процессы обладают определенными техническими проблемами. Так, термическая утилизация органических продуктов происходит при рекомендуемых температурах от 377 до 877 °С [103], что требует больших энергетических ресурсов. Это, в свою очередь, приводит к снижению эффективности процесса переработки углеводородов в отношении производственных и экономических затрат. В агрегате термической деструкции происходит взаимодействие между двумя веществами – углеводородными отходами и теплоносителем (источником тепла для поддержания реакции деструкции), разделенными между собой стенкой. В качестве теплоносителя зачастую используют конвективные газы высокой температуры (от 600 °С и выше), полученные от сжигания ископаемых топлив на факельных горелочных устройствах, комбинирующих радиационный и конвективный теплообмен. Ввиду высоких энергетических затрат использование в качестве тепла электрической энергии считается менее целесообразным [104].

Известно, что состояние поверхности влияет на конвективный теплообмен. Под состоянием поверхности в данном случае понимается ее геометрия, развитая в результате обработки поверхности (механической, электрохимической и др.), образуя при этом термоконтактную поверхность теплообмена. Наличие совокупности неровностей поверхности приводит к образованию возмущений, что способствует образованию различных завихрений движущегося потока газа или жидкости и раннему переходу к турбулентному режиму течения. В свою очередь, интенсификация теплообмена в областях турбулентных течений достигает больших значений по сравнению с областями ламинарных течений при равных начальных условиях. Таким образом, для снижения энергетических затрат в агрегатах термической деструкции необходима разработка научно-технических решений, направленных на повышение качества процесса термической деструкции. В качестве одного из решений выступает применение интенсификаторов теплообмена, как это было обозначено в главе 1 настоящего исследования.

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 [105]. При разрыве связей C–C образуются радикалы, которые взаимодействуют с молекулой углеводорода большего размера. В результате данной реакции образуется 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 [106]. Однако вторичные реакции приводят к образованию веществ, загрязняющих образующиеся углеводородные газы. С целью уменьшения данного эффекта возможно использование интенсифицирующих устройств в виде теплообменных элементов, представляющих собой комбинированную конструкцию из термоконтактной поверхности, клеевой композиции и корпуса реакторного агрегата. При этом термоконтактная поверхность представляет собой конструкцию с развитой геометрией в виде различных выступов и впадин. Таким образом,

термоконтактная поверхность с выступами и впадинами заменяет гладкую термоконтактную поверхность реактора, в результате чего осуществляется совершенствование реакторного агрегата [107].

2.2 Технология изготовления двухэлементного корпуса реакторного агрегата в виде комбинированного теплообменного элемента

Технология изготовления термоконтактных поверхностей лежит в основе способа изготовления комбинированных теплообменных элементов. При этом теплообменный элемент выступает в качестве одной из частей внутреннего корпуса реакторного агрегата, образуя двухэлементный корпус, обеспечивая улучшенные теплофизические характеристики и тем самым эффективность и производительность протекающего процесса. Данная технология состоит из трех основных этапов [108].

1. Образование на металлическом листе термоконтактной поверхности путем деформирования листового материала (рисунок 34, *а*). Для этого используется профилированный барабан 1, состоящий из секций 2, в которых установлены профильные инструменты 3. Профильный барабан 1 расположен на полом вала 4 и закреплен на П-образной державке 5. Приложенная прижимная сила F на П-образную державку равномерно распределяется по двум сторонам полого вала 4, обеспечивая внедрение профильного инструмента 3 в металлический лист 6. Металлический лист 6 расположен на упругом основании 7. Металлический лист 6 и упругое основание 7 также расположены на столе 8. Непрерывная подача стола 8 со скоростью v ($\sim 1000\text{--}2000$ мм/мин) и профильного барабана 1 со скоростью ω ($\omega = vR$) обеспечивает образование термоконтактной поверхности в подготовленные на столе выемки. При этом упругое основание способствует повышению качества образуемой поверхности [109]. Длина полого вала 4 и число секций 2 профильного барабана 1 имеют регулировку под нужные размеры металлического листа 6. Возможные геометрические формы образуемой термоконтактной поверхности представлены на рисунке 34, *б*.

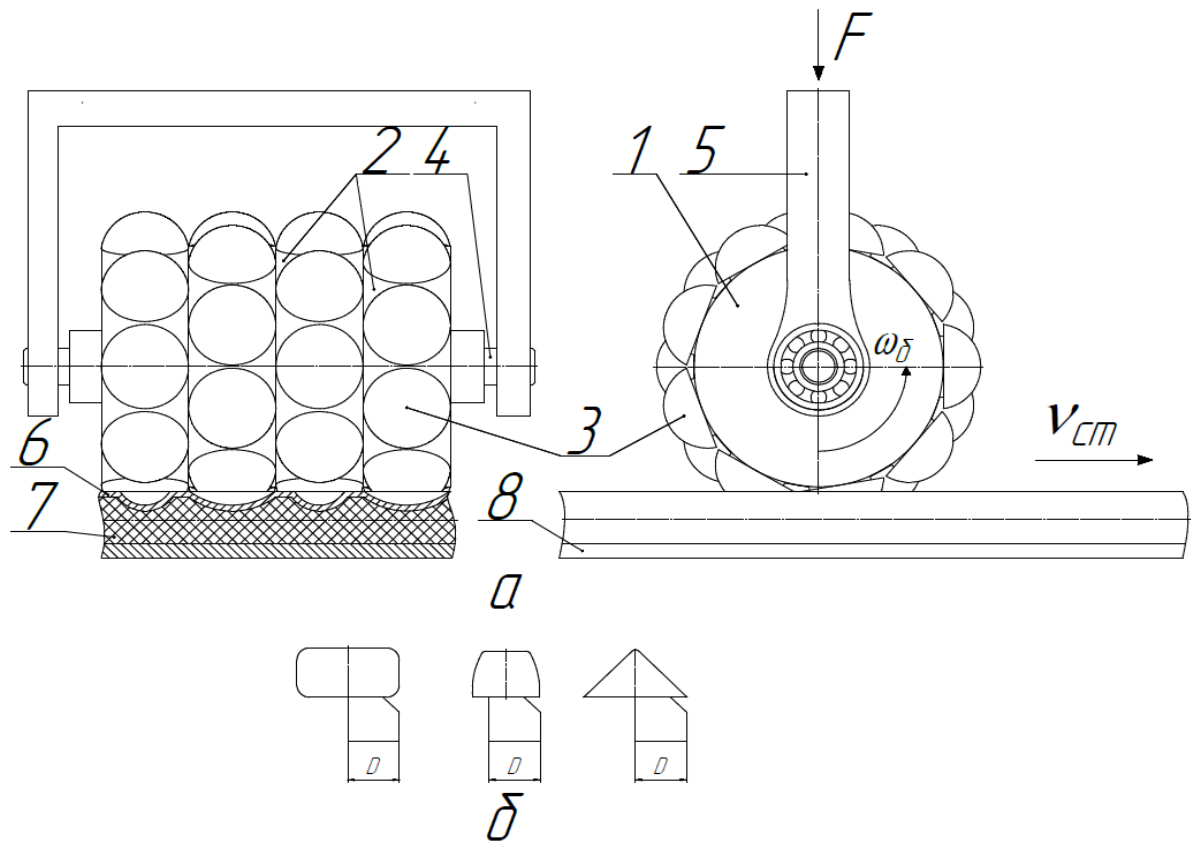


Рисунок 34 – Образование термоконтактной поверхности:

а – формирование термоконтактной поверхности деформированием металлического листа профильным инструментом; *б* – геометрические формы возможных термоконтактных элементов

2. Листогибочная операция (рисунок 35, *а*). По завершении формирования термоконтактной поверхности металлическому листу необходимо придать форму, которая будет повторять форму корпуса реакторного агрегата. Придание формы осуществляется на листогибочном оборудовании. Для этого на профильном барабане 1 производят замену профильных инструментов 3 на насадку в виде упругого основания 9 с целью сохранности формы термоконтактной поверхности. Всего используется три профильных барабана 1 с упругим основанием 9, один из которых для деформации листового материала может выполнять поступательное движение (по вертикали). После этого на сторонах соединения листа формируют форму для будущего замка 10 (рисунок 35, *б*).

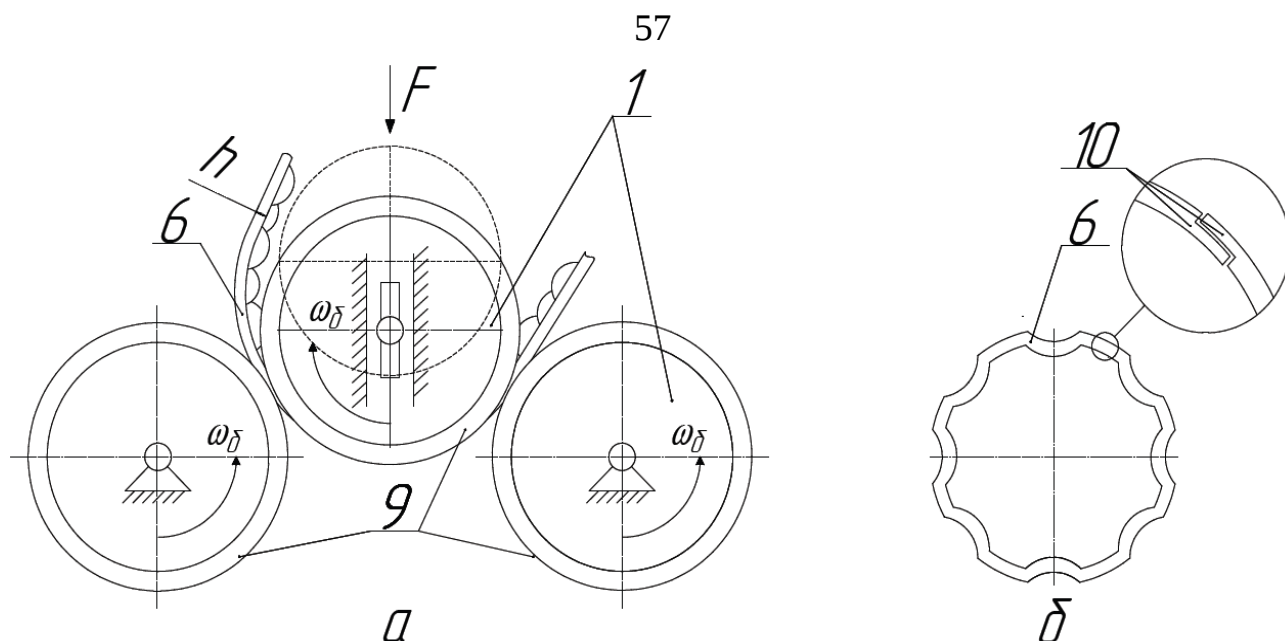


Рисунок 35 – Листогибочная и подготовительная операции:

а – вальцевание металлического листа с термоконтактной поверхностью;

б – подготовка замка для закрепления листа по форме корпуса

3. Сборка теплообменного элемента с помощью склеивания (рисунок 36, *а, б*). С целью обеспечения высокого схватывания поверхности склеивания необходимо обработать. Для этого профильный барабан, состоящий из секций, заменяют игольчатым инструментом 11, располагая его на полем валу 4. На внутренней поверхности корпуса реакторного агрегата 12 образуют шероховатую поверхность поступательно-вращательным движением игольчатого инструмента 11 вниз. Затем путем поступательно-вращательного движения игольчатого инструмента 11 вверх через патрубки 13 наносится необходимое количество клея. С помощью прижимных роликов 14 производится регулировка толщины клеевого шва. После чего металлический лист в виде обечайки 6, повторяющий форму корпуса реакторного агрегата 12 с термоконтактной поверхностью, с одной стороны, и предварительно образованной шероховатостью – с другой, фиксируют и выдерживают внутри корпуса реакторного агрегата 12. Предварительно подготовленный замок 10 также обрабатывается, и наносится клеевая композиция либо осуществляется процесс сварки. В результате этого образуется комбинированный теплообменный элемент (термоконтактная поверхность – клеевая композиция – корпус реактора) (рисунок 36, *в*). Нанесение

клеевой композиции можно также осуществлять через технологический зазор (δ, δ'), при этом необходимо зафиксировать металлический лист 6 и корпус реакторного агрегата 12 для обеспечения соосности (рисунок 36, *з*). В большинстве случаев отдается предпочтение нанесению клеевой композиции с помощью прижимных роликов 14.

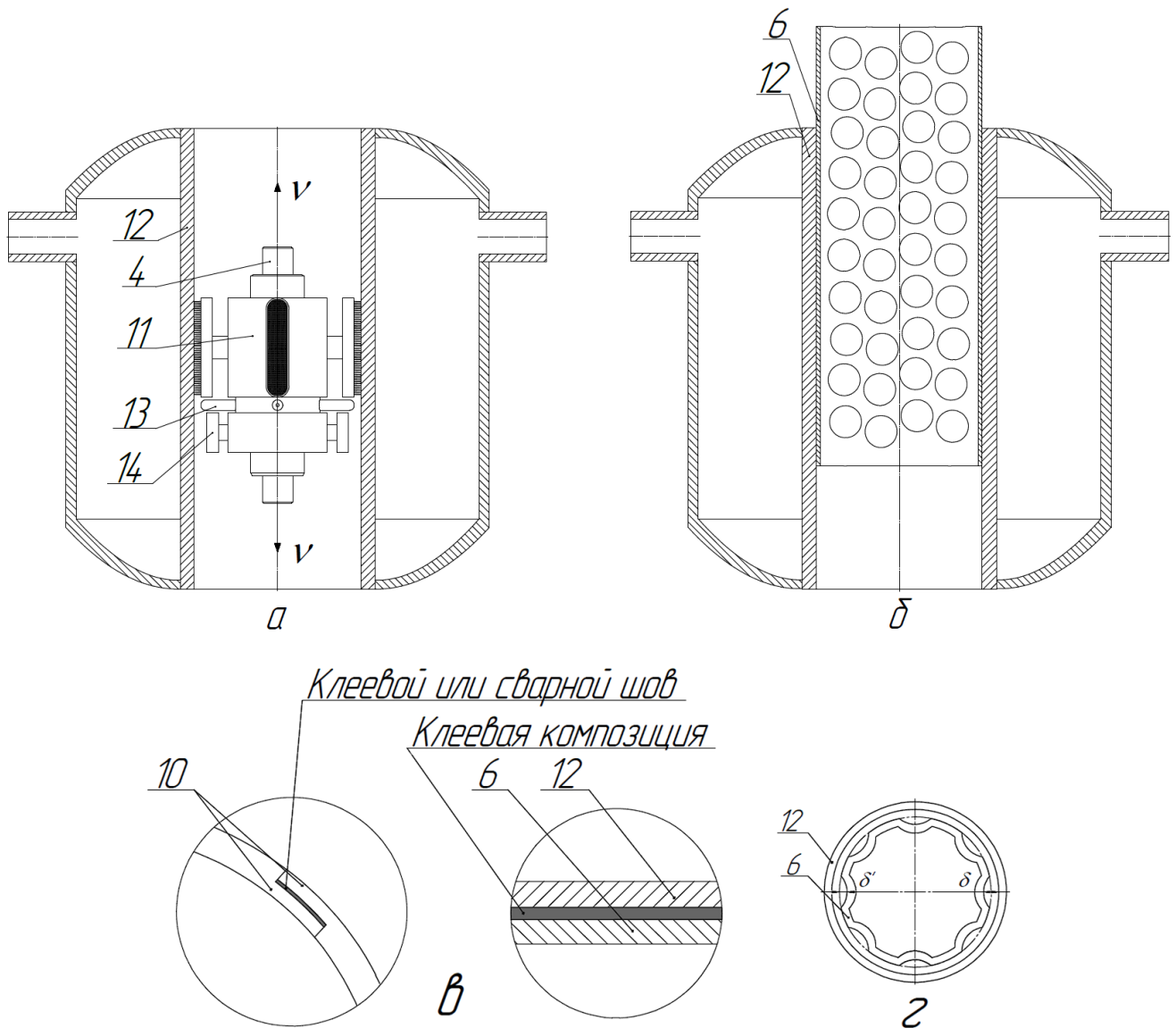


Рисунок 36 – Сборка комбинированного теплообменного элемента:
а – образование шероховатости и клеевой композиции; *б* – фиксация
 металлического листа с термоконтактной поверхностью в корпусе реакторного
 агрегата; *в* – формирование комбинированного теплообменного слоя;
г – статический метод фиксации металлического листа с термоконтактной
 поверхностью

2.3 Математическое моделирование процессов теплообмена в реакторных агрегатах с двухэлементным корпусом

2.3.1 Исследование влияния термоконтактных поверхностей двухэлементного реакторного агрегата на характеристики течения газа в цилиндрическом канале

Основные теплообменные процессы в реакторном агрегате происходят при контакте теплоносителя с термоконтактной поверхностью, в результате чего большая часть тепловой энергии переходит через нее к исходному сырью. Данный тип теплообмена происходит при вынужденной конвекции. Однако, помимо вынужденной конвекции, переход теплоты осуществляется и в окружающую среду (теплоизоляция, воздух и др.), а теплообмен при этом характеризуется естественной конвекцией. Описывается конвективный теплообмен основным законом Ньютона – Рихмана:

$$Q = \alpha S (\theta_s - \theta_0) \tau, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К); S – площадь поверхности, на которой происходит теплообмен, м²; θ_s и θ_0 – температуры поверхности и среды, К; τ – время, с.

Теплофизический анализа технологической реакторной системы сводится к определению коэффициента теплоотдачи α , который характеризует процесс теплообмена между твердым телом и флюидом (жидкая или газообразная среда). При этом необходимо решить следующее дифференциальное уравнение [110]:

$$\alpha = (\theta_s - \theta_0) = -\lambda_0 \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=0}, \quad (2)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(мК); x – ось системы координат с началом на поверхности теплообмена.

С целью определения коэффициента теплоотдачи α необходимо также знать градиент температуры в слое флюида и температурное поле в нем. В случае нестационарного трехмерного поля дифференциальное уравнение для движущегося несжимаемого флюида можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial \theta}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial \theta}{\partial z} = \omega \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

где $\partial \theta / \partial \tau$ – отношение, характеризующее изменение температуры любой точки флюида во времени; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – это проекции вектора скорости движения потока на оси координат.

Так как распределение температур связано с величинами $\omega_x, \omega_y, \omega_z$, то для их определения используют систему дифференциальных уравнений, устанавливающих связь изменения скорости во времени и пространстве [110]:

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{D\omega_x}{D\tau} &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \omega_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial z^2} \right); \\ \rho \frac{D\omega_y}{D\tau} &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 \omega_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_y}{\partial z^2} \right); \\ \rho \frac{D\omega_z}{D\tau} &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 \omega_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где ρ – плотность, кг/м³; p – давление в данной точке потока, Па; μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; $D\omega_x/D\tau, D\omega_y/D\tau, D\omega_z/D\tau$ – производные от скорости по времени для осей x, y и z ; g_x, g_y, g_z – проекции ускорения силы тяжести на оси x, y и z .

Для определения коэффициента теплоотдачи α необходимо добавить дифференциальное уравнение неразрывности потока:

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

Представленная система уравнений может быть решена для простых случаев. Исходя из практики, данные случаи далеки от реальных, в результате чего результаты расчетов являются некорректными. Ввиду этого для определения коэффициента теплоотдачи α целесообразно решать систему уравнений (2)–(5) численными методами при помощи ЭВМ или использовать обобщенные результаты экспериментов. При этом обобщают экспериментальные данные с помощью критериев подобия, а результаты представляют в виде критериального уравнения следующего вида:

$$Nu = C Re^m Pr^n Gr^p \varepsilon_i, \quad (6)$$

где $Nu = \alpha l / \lambda$ – критерий Нуссельта; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); l – характерный размер, м; λ – коэффициент теплопроводности среды (для труб – эквивалентный диаметр), Вт/(м·К); Re , Pr , Gr – критерии теплового подобия Рейнольдса, Прандтля и Грасгофа; C , m , n , p – коэффициент и показатели степеней, числовые значения которых определяются опытным путем; ε_i – поправка, учитывающая внутреннюю геометрию канала.

Многие экспериментальные исследования показывают четкую связь увеличения теплоотдачи в трубах и каналах в зависимости от формы и расположения внутренних выступов. Одним из важнейших отношений при расчетах теплообмена каналов с выступами как при ламинарном, так и при турбулентном течении теплоносителя является отношение t/h (t – шаг выступов, h – высота выступов). Высота выступов h также оказывает существенное влияние на теплообмен. Наиболее эффективным по экспериментальным данным считается расположение выступов в шахматном порядке. Ввиду этого высота и шаг полусферических выступов выбирается исходя из выражения, полученного

В.Н. Крюковым и В.П. Солнцевым для поверхностей с выступами различного шага [111]:

$$\frac{\alpha_{\text{выс}}}{\alpha_{\text{гл}}} = 0,91 + 0,275 \ln \left(\frac{t}{h} \right), \quad (7)$$

где $\alpha_{\text{выс}}$, $\alpha_{\text{гл}}$ – коэффициенты теплоотдачи через канал с выступами и через гладкий канал соответственно, Вт/(м²·К); t и h – шаг и высота образованных в канале выступов, м. В большинстве случаев наиболее оптимальным t/h считается меньше либо равным 10 ($t/h \leq 10$).

Кроме того, высота выступов h также зависит от диаметра канала $d_{\text{эк}}$ с термодетальной поверхностью. Поправочный коэффициент, полученный А.В. Злобиным и С.Э. Тарасевичем, также может быть использован для определения оптимальной высоты полусферических выступов [112]:

$$\varepsilon_{\text{выс}} = 1 + 2,8 \left(h / d_{\text{эк}} \right)^{0,3}, \quad (8)$$

где $d_{\text{эк}}$ – соответствующий эквивалентный диаметр, мм; h – высота выступов (неровностей), мм. При этом данный поправочный коэффициент учитывается при числах Рейнольдса до 90000 и отношении $h/d_{\text{эк}} = 0,025\text{--}0,065$.

В случае использования газа в качестве теплоносителя критерии Нуссельта для ламинарного и турбулентного режимов течения с использованием поправочного коэффициента (8) ориентировочно могут быть определены следующим образом:

$$Nu_{\text{лам}} = 0,146 Re^{0,33} Gr^{0,1} \varepsilon_{\text{выс}}; \quad (9)$$

$$Nu_{\text{тур}} = 0,018 Re^{0,8} \varepsilon_{\text{выс}}. \quad (10)$$

Эквивалентный диаметр для гладкой трубы и трубы с выступами при этом можно определить следующим образом [113]:

$$d_{\text{эк}} = d_{\text{ср}} = \left(\frac{4V}{\pi L} \right)^{0,5}, \quad (11)$$

где $d_{\text{ср}}$ – среднеобъемный диаметр трубы; V – внутренний объем трубы (канала), по которому движется среда, м³; L – длина трубы (канала), м.

При заданном устойчивом ламинарном и турбулентном течении теплоносителя без изменения его агрегатного состояния и при стационарных условиях расчет коэффициента теплоотдачи для канала с термоконтантной поверхностью в виде выступов с учетом выражения (7) можно осуществить следующим образом:

$$\alpha_{\text{выс}} = \frac{Nu \lambda (0,91 + 0,275 \ln \left(\frac{t}{h} \right))}{l}, \quad (12)$$

где $0,91 + 0,275 \ln(t/h)$ – часть выражения, учитывающая влияние высоты выступов и шага выступов на теплообмен; Nu – критерий Нуссельта; λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·К); l – определяющий геометрический размер, м.

В свою очередь, при использовании поправочного коэффициента (8) выражение для определения коэффициента теплоотдачи можно записать следующим образом:

$$\alpha_{\text{выс}} = \frac{Nu_{\text{лам,тур}} \lambda}{l}, \quad (13)$$

где Nu – критерий Нуссельта, определенный из выражений (9), (10) с учетом поправочного коэффициента (8); λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м·К); l – определяющий геометрический размер, м.

Влияние отношения шага и высоты выступов t/h , а также отношения высоты выступов к эквивалентному диаметру $h/d_{\text{эк}}$ на производительность реакторного агрегата в виде интенсификации теплообмена можно продемонстрировать зависимостями, представленными на рисунках 37, 38.

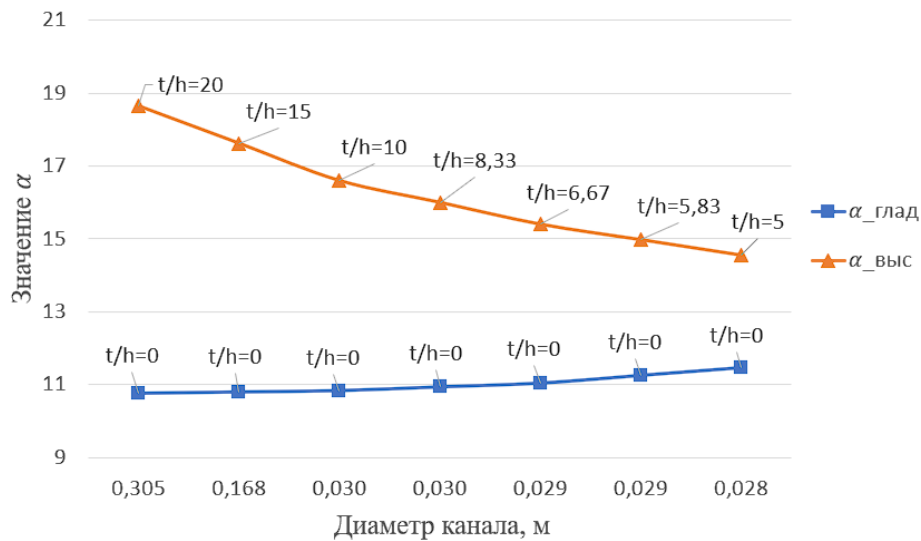


Рисунок 37 – Изменение коэффициента теплопередачи α в зависимости от отношения t/h

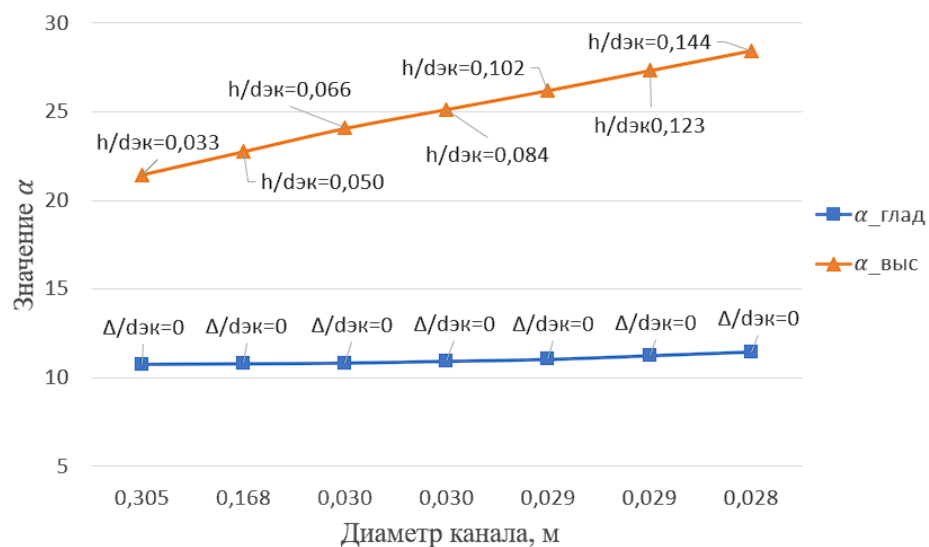


Рисунок 38 – Изменение коэффициента теплопередачи α в зависимости от отношения $h/d_{\text{эк}}$

С целью определения эффективности теплообмена в реакторном агрегате с двухэлементным корпусом в виде комбинированного теплообменного элемента были подготовлены имитационные компьютерные модели. Хотя поправочные коэффициенты (7) и (8) ориентировочно устанавливают зависимости изменения теплоотдачи в зависимости от геометрических размеров выступов (для данных условий), тем не менее на данный момент отсутствует обобщенное уравнение для определения величины интенсивности теплоотдачи (учитывающее множество параметров). Ввиду этого необходимо установить взаимосвязь между геометрическими параметрами, а также возможность приблизительного оценивания интенсивности теплопередачи с помощью данных поправочных коэффициентов. Для исследования термодинамических процессов в реакторном агрегате использовался программный комплекс COMSOL Multiphysics 5.5. Модели для исследования подготавливались посредством САПР SolidWorks. Сравнение проводилось при турбулентном течении газа в гладком канале реакторного агрегата и в модифицированном канале с термоконтактными поверхностями.

В качестве модели течения газа в цилиндрическом канале использовалась турбулентная модель типа $k-\epsilon$. Данная модель позволяет более точно описывать течения газа в областях с искривлённой (различные неровности) геометрией, характеризуясь при этом высокой точностью расчетов [114, 115].

Объектом имитационного моделирования служила разработанная конструкция технологического реактора пиролиза (масштаб модели 1:10 с сохранением толщины стенок), состоящая из внешнего корпуса 1, крышек 2, одно- (в случае канала без выступов) и двухэлементного внутреннего корпуса 3, входных 4 и выходных 5 патрубков для исходного сырья, перегородок 6. При этом двухэлементный корпус представляет собой комбинированный теплообменный элемент, состоящий из трех объектов: термоконтактная поверхность, клеевая композиция и внутренний корпус реактора (рисунок 39).

Фактически принцип работы данного реактора можно описать следующим образом. Жидкие углеводороды, например нефтяные отходы, поступают через трубу для подачи исходного сырья 4 и заполняют рабочее пространство

реакционной камеры реактора. Далее осуществляется непрерывная подача теплоносителя через теплообменный элемент 3. По истечению некоторого времени реакции прореагировавшие вещества выводятся посредством патрубка 5.

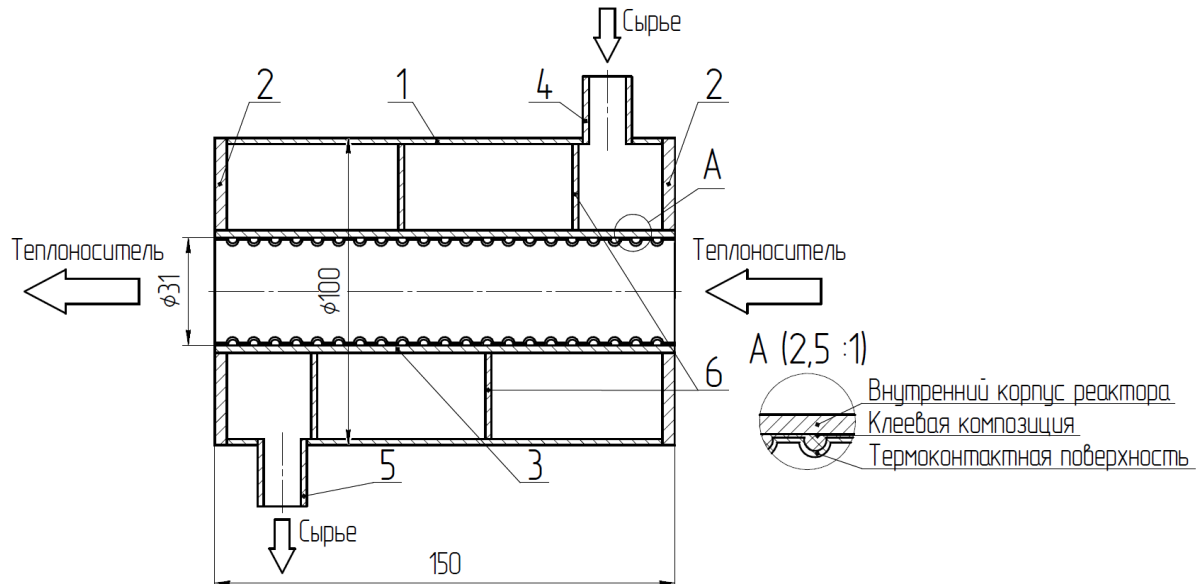


Рисунок 39 – Продольное сечение технологического реакторного агрегата термической деструкции с габаритными размерами

В качестве газа-теплоносителя выбран азот из условия, что более 70 % этого газа вырабатывается при сжигании углеводородного топлива (из состава дымовых газов) [116]. Предполагается, что для поддержания температуры реакции будет использоваться попутный нефтяной или природный газ посредством его сжигания с образованием тепла. Скорость протекания углеводородов, равная $3 \cdot 10^{-4}$ м/с, позволит смоделировать нахождение отходов практически в состоянии покоя (без движения). Использование отработанного масла (двигателей, компрессоров, насосов и др.) обусловлено тем, что оно является одним из наиболее распространённых среди жидких углеводородных отходов, за счет переработки которого можно получить топливные компоненты.

Одноэлементный корпус реактора в процессе моделирования представлял собой цилиндрический канал длиной 150 мм, диаметром 31 мм и толщиной стенки 2,5 мм. Двухэлементный корпус реактора отличался от одноэлементного толщиной стенки, которая была равна 5 мм. Диаметр корпуса реактора в двухэлементном

исполнении рассчитывался индивидуально в зависимости от высоты выступов. При определении теплового потока становится ясно, что рекомендуемая толщина клеевого слоя с более низкой теплопроводностью не оказывает существенного влияния на получаемый результат. Точность измерения в данном случае исчисляется тысячным знаком после запятой, поэтому для упрощения модели в процессе моделирования клеевым соединением можно пренебречь.

Термоконтактная поверхность в процессе моделирования была образована сфероидальными выступами в виде полусфер высотой $h = 1, 2, 3$ и 4 мм. Расстояние между центрами термоконтактных элементов вдоль образующей канала t составляло 20 мм, вдоль направляющей канала $k - 9,7$ мм (точный $9,734$ мм) (рисунок 40). В качестве дополнительных исследований производилось увеличение расстояния вдоль направляющей канала k до $16,2$ мм и его уменьшение до $5,7$ мм. Как отмечалось ранее, для более эффективного теплообмена термоконтактные элементы целесообразно располагать в шахматном порядке. В качестве термоконтактных элементов отдается предпочтение использованию полусферических выступов из-за способности интенсифицировать теплообмен [117]. Кроме этого, проводилось сравнение между выступами, образованными полусферами, и выступами, образованными иной геометрической формой, а также сравнение при изменении расстояния между выступами и толщины стенки канала.

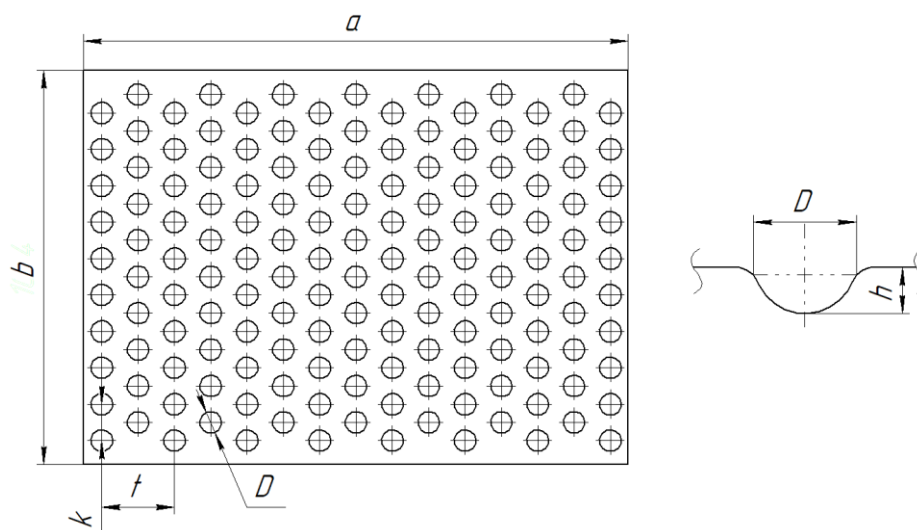


Рисунок 40 – Развертка термоконтактной поверхности с расположением полусферических выступов

Условия проведения имитационного моделирования по пиролизу углеводородных отходов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Условия для проведения имитационного моделирования

Параметр	Значение
Газ-теплоноситель	Азот
Скорость течения газа-теплоносителя v , м/с	1, 3 и 5
Высота полусферических выступов h , мм	1, 2, 3 и 4
Начальная температура газа-теплоносителя, °С	700
Исходное углеводородное сырье	Отработанное масло
Скорость движения углеводородного сырья, м/с	$3 \cdot 10^{-4}$
Начальная температура углеводородного сырья, °С	20
Материал реактора	Сталь AISI 310S
Теплопроводность стали, Вт/(м·К)	14,2
Давление газа-теплоносителя на входе в реактор, МПа	0,101
Плотность отработанного масла при 15 °С, кг/м ³	878
Вязкость отработанного масла при 40 °С, мм ² /с	5,4
Удельная теплоемкость отработанного масла при 40 °С, Дж/(кг·К)	2,173

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:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0, \quad (14)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla u = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + F, \quad (15)$$

$$\tau = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I, \quad (16)$$

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q, \quad (17)$$

$$q = -k_f \nabla T, \quad (18)$$

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/м²К.

Граничные условия для проведения моделирования изображены на рисунке 41. На входах 1 и 3 течения потоков теплоносителя и масла соответственно было задано условие полностью развитого течения по средней скорости потока («Fully developed flow», «Average velocity»). На выходах 2 и 4 течения потоков теплоносителя и масла соответственно было установлено нулевое манометрическое давление ($P_0 = 0$). Также были установлены параметры нормального потока («Normal flow») и отсутствия обратного течения потоков («Suppress backflow»). При моделировании потока учитывалось условие сжимаемого потока («Compressible Flow (Ma < 0,3)»). Ко всем внутренним поверхностям, обозначенным на рисунке 41 белым цветом, и полусферическим выступам применялось условие тонкого слоя («Thin Layer»). Для потока газа-теплоносителя и отработанного масла было обеспечено граничное условие в виде отсутствия прилипания («No slip»).

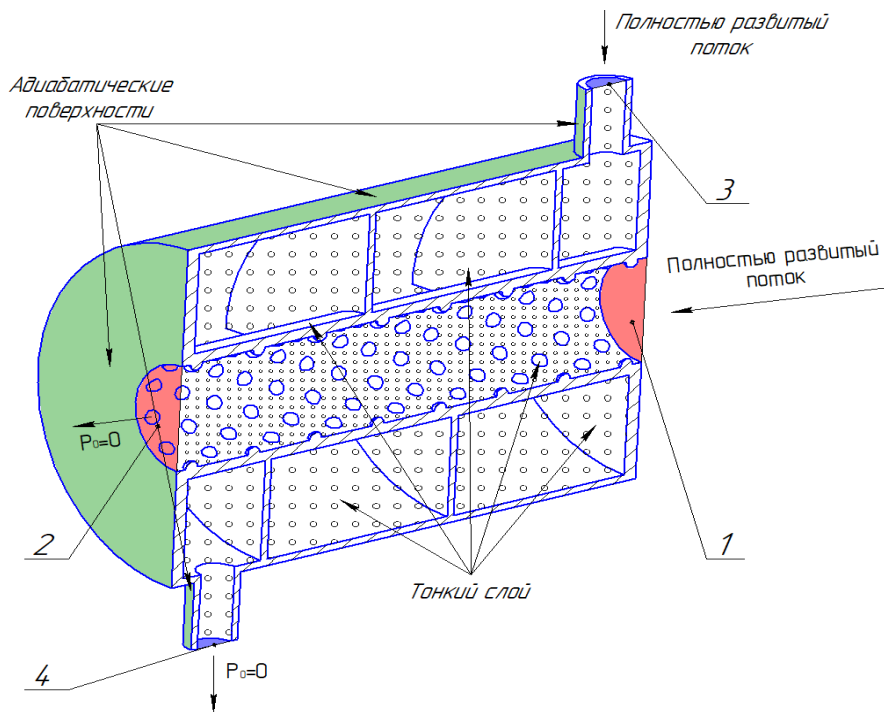


Рисунок 41 – Трехмерный перспективный вид вычислительной области

2.3.2 Оценка эффективности применения термоконтактных поверхностей в реакторных агрегатах

Как показывают экспериментальные данные, при модифицировании цилиндрического канала полусферическими выступами наблюдается увеличение средней температуры реакционной камеры технологического реактора (таблица 3). Движение теплоносителя при этом характеризуется турбулентным течением газа как в гладком канале, так и в канале с модифицированной поверхностью.

Таблица 3 – Результаты исследования эффективности применения полусферических выступов

Разновидность теплообменного элемента	Скорость течения теплоносителя, м/с	Средняя температура реактора T , °C	Увеличение средней температуры, %
			$\frac{T_{\text{канала с выступами}} - T_{\text{гладкого канала}}}{T_{\text{гладкого канала}}} 100 \%$
Цилиндрический гладкий канал (толщина стенки 2,5 мм)	1	505,0	—
	3	581,5	—
	5	607,5	—

Окончание таблицы 3

Разновидность теплообменного элемента	Скорость течения теплоносителя, м/с	Средняя температура реактора T , °C	Увеличение средней температуры, %
			$\frac{T_{\text{канала с выступами}} - T_{\text{гладкого канала}}}{T_{\text{гладкого канала}}} 100 \%$
Цилиндрический канал с полусферическими выступами 1 мм (толщина стенки 5 мм)	1	521,8	3,3
	3	592,5	1,9
	5	615,6	1,3
Цилиндрический канал с полусферическими выступами 2 мм (толщина стенки 5 мм)	1	545	7,9
	3	607,1	4,4
	5	626,7	3,2
Цилиндрический канал с полусферическими выступами 3 мм (толщина стенки 5 мм)	1	557,3	10,4
	3	615,9	5,9
	5	634,5	4,4
Цилиндрический канал с полусферическими выступами 4 мм (толщина стенки 5 мм)	1	563,3	11,5
	3	619,1	6,5
	5	636,8	4,8

Модификация канала полусферическими выступами высотой 1 мм приводит к увеличению средней температуры на 16,8, 11 и 8,1 °C по сравнению с гладким каналом ($t/h = 20$, $h/d_{\text{эк}} = 0,033$, $d_{\text{эк}} = 30,51$ мм). Расчет эквивалентного диаметра производился по уравнению (11). Незначительное увеличение средней температуры можно объяснить несоблюдением условия $t/h \leq 10$, что подтверждается соответствующими расчётами. Дальнейшее увеличение скорости от 7 м/с и выше приводит к уменьшению разницы средней температуры реактора относительно плоского цилиндрического канала. Таким образом, при высоких скоростях течения теплоносителя эффективность применения комбинированного теплообменного элемента с термоконтактными элементами высотой 1 мм равна эффективности применения гладкого цилиндрического канала. График сходимости рабочих параметров во всех случаях имел следующий вид (рисунок 42). В проводимых исследованиях наблюдались значительные колебания графика сходимости параметров среды: теплопроводности, давления и турбулентности потока.

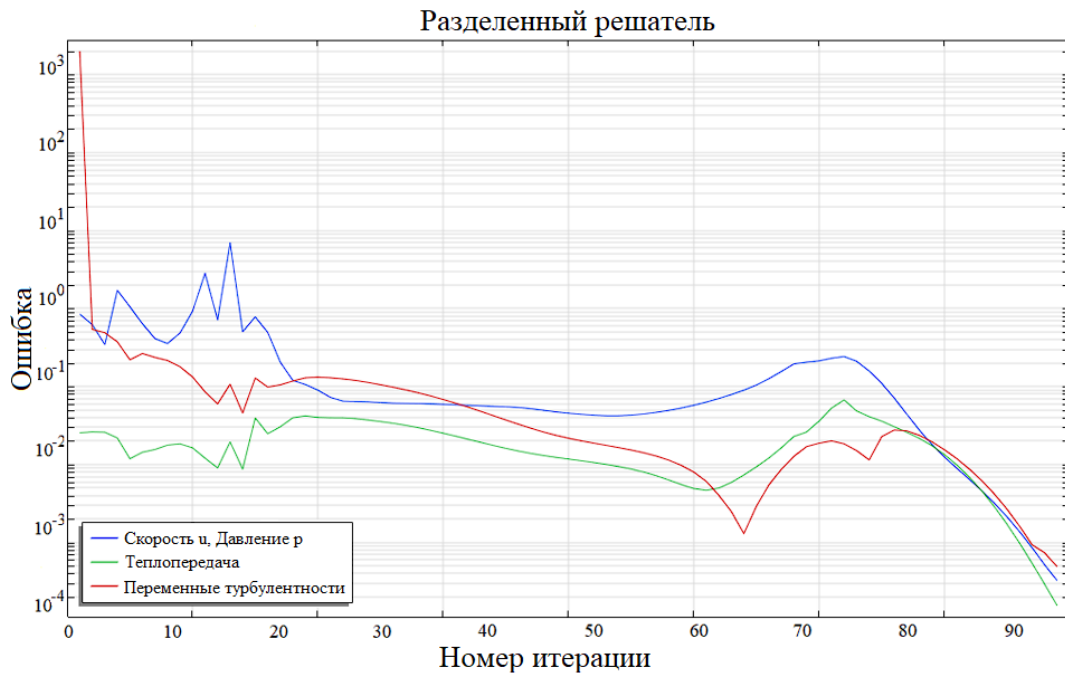


Рисунок 42 – График сходимости параметров скорости и давления теплоносителя, теплопередачи и параметра турбулентности

При значениях $h = 2$ мм и $d_{\text{эк}} = 30,2$ мм соотношения t/h и $h/d_{\text{эк}}$ составили $t/h = 10$, $h/d_{\text{эк}} = 0,066$, при значениях $h = 3$ мм и $d_{\text{эк}} = 29,35$ мм – $t/h = 6,67$, $h/d_{\text{эк}} = 0,102$. Использование полусферических выступов высотой 3 мм сопровождается снижением прироста средней температуры реактора (таблица 3). Если в случае применения выступов высотой 2 мм средняя температура повысилась на $19,2\text{--}40,0$ °С, то в случае применения выступов 3 мм средняя температура находилась в диапазоне $27,0\text{--}52,3$ °С.

В канале с полусферическими выступами высотой 4 мм ($t/h = 5$, $h/d_{\text{эк}} = 0,144$) и скоростью теплоносителя 1, 3 и 5 м/с средняя температура в реакторе составила $563,3$, $619,1$ и $636,8$ °С. При изменении величины выступов с 3 до 4 мм увеличение температуры происходит на 6 , $3,2$ и $2,3$ °С. Данное явление можно объяснить тем, что высота выступов достигает таких значений относительно диаметра канала, что образующиеся вихри становятся менее устойчивыми, в результате чего повышается вероятность их попадания в основной поток. Ввиду незначительного прироста средней температуры в реакторе образование выступов 4 мм при диаметре канала 31 мм является нецелесообразным.

В случае увеличения межцентрового расстояния вдоль образующей с 20 до 40 мм ($t/h = 20$) при высоте выступов 2 мм наблюдалось уменьшение температуры реакционной камеры на 14,5, 12,3 и 11,4 °С. Результаты с определенной погрешностью согласуются с результатами при высоте выступов 1 мм и $t/h = 20$. Сравнение производилось с каналом с полусферическими выступами высотой 2 мм при различных скоростях течения теплоносителя (рисунок 43).

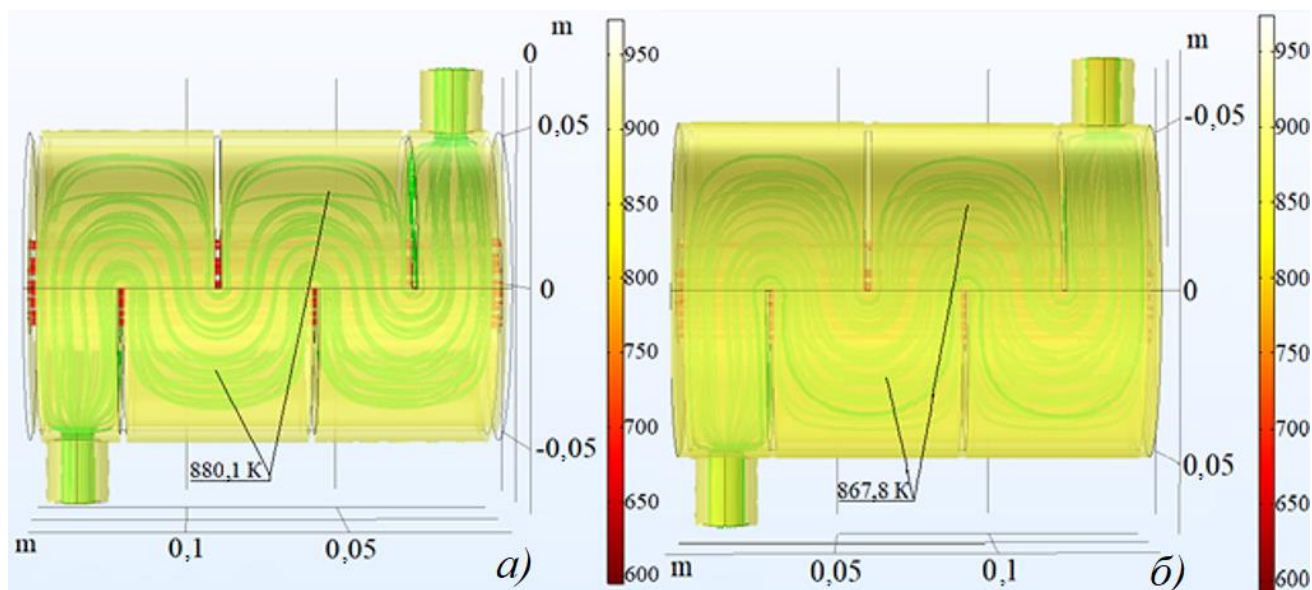


Рисунок 43 – Модели теплопередачи в реакторе пиролиза при утилизации отработанного масла:

а – полусферические выступы высотой 2 мм, межцентровое расстояние 20 мм, скорость 3 м/с; *б* – полусферические выступы высотой 2 мм, межцентровое расстояние 40 мм, скорость 3 м/с

Толщина стенки комбинированного теплообменного элемента не оказывала существенного влияния на температуру. При уменьшении толщины стенки с 5 до 2,5 мм средняя температура реактора в среднем увеличилась на 1,5 °С.

При замене полусферических выступов конусными выступами, имеющими в основании диаметр, эквивалентный полусферическим выступам и равны высоте (2 мм), отслеживалось уменьшение температуры. При 1 м/с средняя температура составила 537,1 °С, при 3 м/с – 600 °С, при 5 м/с – 619,5 °С (рисунок 44). Ввиду этого сферические выступы являются наиболее оптимальными для образования их

на термоконтактной поверхности комбинированного теплообменного элемента. Использование иных форм термоконтактных элементов (цилиндрической, эвольвента–зубчатой) также приводило к снижению средней температуры реактора (по сравнению с полусферическими) вследствие более худшего обтекания.

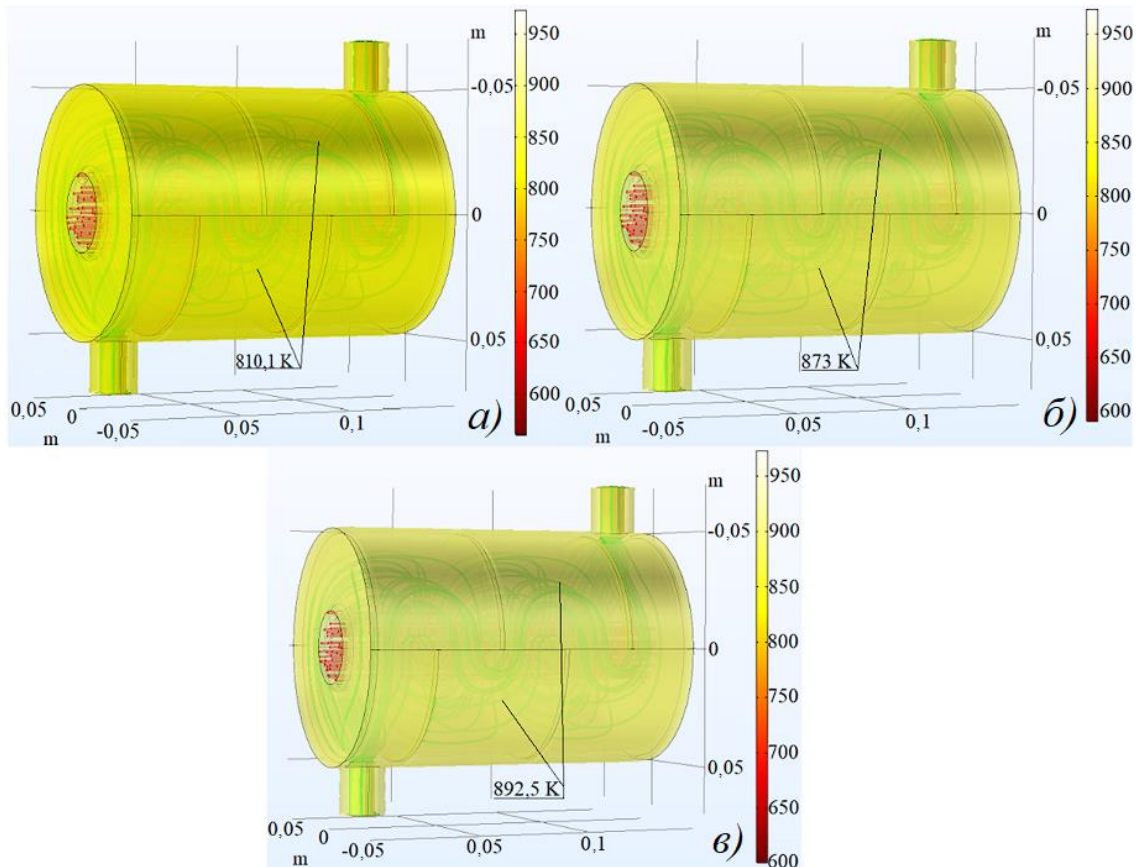


Рисунок 44 – Модели теплопередачи в реакторе пиролиза при утилизации отработанного масла:

а – конусные выступы, межцентровое расстояние 20 мм, скорость 1 м/с; *б* – конусные выступы, межцентровое расстояние 20 мм, скорость 3 м/с; *в* – конусные выступы, межцентровое расстояние 20 мм, скорость 5 м/с

По результатам имитационного моделирования становится ясно, что наиболее оптимальной высотой полусферических выступов является величина 2 мм (отношение канала с выступами к гладкому каналу, равное 0,97) при отношении $h/d_{\text{жк}} = 0,066$, так как средний прирост температуры максимален. Кроме того, небольшая высота выступов оказывает меньшее влияние на утонение материала,

которое происходит при формировании термоконтактной поверхности путем воздействия на металлический лист профильным инструментом.

Для оценки потерь давления в канале с теплоносителем был рассчитан выведенный из формулы Дарси – Вейсбаха коэффициент гидравлического сопротивления, рассчитанный следующим образом [118]:

$$f = \frac{2\Delta p D_r}{\rho_r u^2 L}, \quad (19)$$

где Δp – перепад давления в канале (на основе эюр давления), Па; D_r – гидравлический диаметр канала, м; ρ_r – плотность газа-теплоносителя, кг/м³; u – средняя скорость течения теплоносителя в канале, м/с; L – длина канала, м.

Гидравлический диаметр $D_r = d_{\text{эк}}$, который рассчитывается по выражению (11). Перепад давления в канале с теплоносителем определялся исходя из эюр давления, определенных в процессе моделирования. Скорость течения теплоносителя определялась в соответствии с таблицей 2. Плотность газа-теплоносителя (азота) равнялась 0,34 кг/м³ (при 700 °С и давлении 1 кг/см²).

Влияние скорости течения теплоносителя и высоты полусферических выступов на коэффициент гидравлического сопротивления f представлено на рисунке 45.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что образование полусферических выступов и увеличение их высоты способствует возрастанию коэффициента гидравлического сопротивления. Увеличение высоты выступов приводит к увеличению гидравлического сопротивления, что, в свою очередь, до некоторых пределов положительно сказывается на теплопередающей способности канала. Наибольший коэффициент гидравлического сопротивления наблюдается при значении скорости течения теплоносителя, равном 1 м/с во всех рассматриваемых каналах (с выступами и без). Между 1 и 3 м/с скорость падения f тем сильнее, чем выше высота выступа и, соответственно, падение давления в канале. При скорости 3 м/с изменяется наклон кривой коэффициента

гидравлического сопротивления. Между 3 и 5 м/с кривая приобретает практически линейную зависимость, при этом квадрат скорости течения теплоносителя пропорционален и практически соответствует падению давления. Из чего можно сделать вывод, что увеличение скорости течения теплоносителя, начиная от 3 м/с и выше, является нецелесообразным ввиду увеличения затрат на поддержание высокой скорости теплоносителя и низких показателей прироста теплопередающей способности канала.

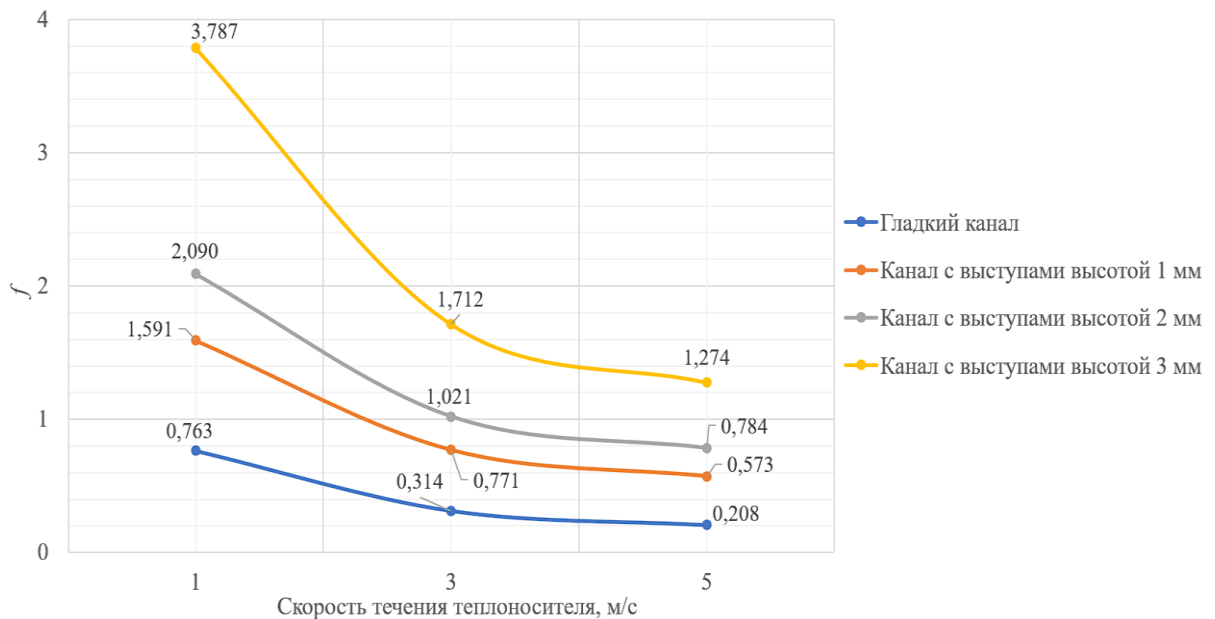


Рисунок 45 – Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от скорости течения теплоносителя

Из представленного выражения (7) становится ясно, что в нем присутствует переменная, учитывающая расстояние между выступами вдоль образующей канала, но отсутствует переменная, учитывающая расстояние между выступами вдоль направляющей. Ввиду этого необходимо провести дополнительное моделирование для определения влияния расстояния между выступами вдоль направляющей на теплообмен. Проведение данных исследований позволит оптимизировать переменные шага между выступами. Для данного моделирования воспользуемся подготовленной моделью, габаритные характеристики которой указаны на рисунке 39. При этом в качестве изменяемого параметра будем

использовать расстояние вдоль направляющей канала, которое примем равным 5,7 и 16,2 мм. Остальные показатели оставим неизменными.

Результаты проведенных исследований можно представить в виде таблицы 4. По результатам моделирования становится ясно, что повышение шага приводит к уменьшению средней температуры реактора во всем диапазоне скоростей течения теплоносителя и высоты выступов. Уменьшение шага является причиной увеличения количества полусферических выступов, в результате чего повышается средняя температура реактора. При этом при повышении скорости течения теплоносителя в случаях, представленных в таблице 3, и случаях, представленных в таблице 4, наблюдается уменьшение среднего прироста температуры. Это может быть объяснено явлением вязкого подслоя. Если толщина вязкого подслоя больше высоты выступов, то они целиком покрываются им. При малых скоростях течения теплоноситель плавно обтекают полусферические выступы, и они не оказывают существенного влияния на характер потока. При возрастании числа Рейнольдса толщина вязкого подслоя уменьшается. При достижении определённой кондиции толщина вязкого подслоя может оказаться меньше высоты выступов. Это, в свою очередь, приводит к диссипации кинетической энергии турбулентности потока с изменением теплообмена между теплоносителем и поверхностью теплообмена.

Из данных, представленных в таблице 4, также видно, что при уменьшении шага вдоль направляющей с 9,7 на 5,7 мм средний прирост температуры составляет 1,6–2,3 %. Увеличение шага с 9,7 мм до 16,2 мм способствует уменьшению средней температуры на 0,5–1,7 %.

Таблица 4 – Результаты исследования эффективности применения полусферических выступов при изменении шага вдоль направляющей канала

Разновидность теплообменного элемента	Скорость течения теплоносителя, м/с	Средняя температура реактора T , °C	Увеличение средней температуры, % $\frac{T_{\text{канала с выступами}} - T_{\text{гладкого канала}}}{T_{\text{гладкого канала}}} 100 \%$
Цилиндрический гладкий канал	1	505,0	—

Окончание таблицы 4

Разновидность теплообменного элемента	Скорость течения теплоносителя, м/с	Средняя температура реактора T , °C	Увеличение средней температуры, % $\frac{T_{\text{канала с выступами}} - T_{\text{гладкого канала}}}{T_{\text{гладкого канала}}} 100 \%$
Цилиндрический гладкий канал	3	581,5	—
	5	607,5	—
Цилиндрический канал с полусферическими выступами высотой 1 мм (расстояние вдоль направляющей $k = 5,7$ мм)	1	528,9	4,7
	3	598,6	2,9
	5	621,2	2,3
Цилиндрический канал с полусферическими выступами высотой 1 мм (расстояние вдоль направляющей $k = 16,2$ мм)	1	510,0	1,0
	3	583,5	0,3
	5	608,6	0,2
Цилиндрический канал с полусферическими выступами высотой 2 мм (расстояние вдоль направляющей $k = 5,7$ мм)	1	552,6	9,4
	3	613,5	5,5
	5	632,5	4,1
Цилиндрический канал с полусферическими выступами высотой 2 мм (расстояние вдоль направляющей $k = 16,2$ мм)	1	532,9	5,5
	3	598,0	2,8
	5	619,7	2,0
Цилиндрический канал с полусферическими выступами высотой 3 мм (расстояние вдоль направляющей $k = 5,7$ мм)	1	565,2	11,9
	3	622,4	7,0
	5	640,4	5,4
Цилиндрический канал с полусферическими выступами высотой 3 мм (расстояние вдоль направляющей $k = 16,2$ мм)	1	544,9	7,9
	3	606,7	4,3
	5	627,5	3,3

В ходе экспериментальных исследований установлено, что увеличение скорости течения теплоносителя в обоих случаях (гладкий канал и канал с полусферическими выступами) приводило к возрастанию средней температуры в реакционной зоне реактора, что обусловлено возникновением турбулентности потока. В случае реактора термической деструкции с полусферическими выступами возрастание средней температуры в реакционной камере также

обусловлено образованием завихрений. Данные выступы позволяют движущемуся потоку натекают на переднюю кромку выступа и обтекают его с формированием вихря. Дальнейшее течение потока к задней части выступа сопровождается образованием еще нескольких вихрей. При этом с тыльной стороны выступа происходит образование застойной зоны, что ограничивает прирост средней температуры.

Повышение средней температуры в реакторе при использовании канала с полусферическими выступами можно также объяснить образованием вязкого подслоя. Если толщина вязкого подслоя больше высоты выступов, то они целиком покрываются вязким подслоем. При малых скоростях течения теплоносителя он плавно обтекают полусферические выступы, и они оказывают меньшее влияния на характер потока. При возрастании скорости течения теплоносителя (числа Рейнольдса) толщина вязкого подслоя уменьшается. Достигнув определённой кондиции, толщина вязкого подслоя может оказаться меньше высоты выступов, что спровоцирует усиление вихреобразования. Это, в свою очередь, приводит к диссипации кинетической энергии турбулентности потока, улучшая теплообмен между теплоносителем и поверхностью теплообмена.

Таким образом, повышение скорости течения теплоносителя в трубчатых реакторах пиролиза может способствовать уменьшению их массогабаритных характеристик, так как повышается эффективность теплообмена. Однако стоит учитывать физико-химические свойства теплоносителей. Если коэффициенты теплоотдачи у теплоносителей значительно отличаются, то скорость теплоносителя с более высоким коэффициентом теплоотдачи будет иметь минимальное влияние на коэффициент теплопередачи. Ввиду этого может потребоваться корректировка размеров при проектировании реакторных агрегатов.

Необходимость разработки эффективной конструкции реакторного агрегата с термоконтактной поверхностью обуславливает целесообразность использования в этих целях математических методов обработки эксперимента.

Основными задачами применения математических методов при исследовании теплообмена в процессе термической деструкции углеводородных отходов являются:

- математическое описание взаимосвязей конструктивно-технологических и режимных параметров реакторного агрегата с модифицированной поверхностью;
- оптимизация процесса термической деструкции углеводородных отходов при применении термоконтактной поверхности с полусферическими выступами.

Для решения данных задач воспользуемся программным пакетом для статического анализа Statistica 10. При описании взаимосвязей и определении оптимальных параметров будем использовать общие регрессионные методы, в частности, регрессию поверхности отклика. Данный вид регрессии позволяет производить анализ интерактивных и полиномиальных эффектов нескольких непрерывных предикторов.

В качестве исходных данных будем использовать скорость течения теплоносителя v , расстояние вдоль направляющей канала k и отношение шага выступов к высоте выступов (t/h), в качестве выходного параметра – температуру в реакторе T (рисунок 46). Исходные данные были разделены на 27 наблюдений (опытов) и распределены в соответствии со значениями, полученными при математическом имитационном моделировании (таблица 5).

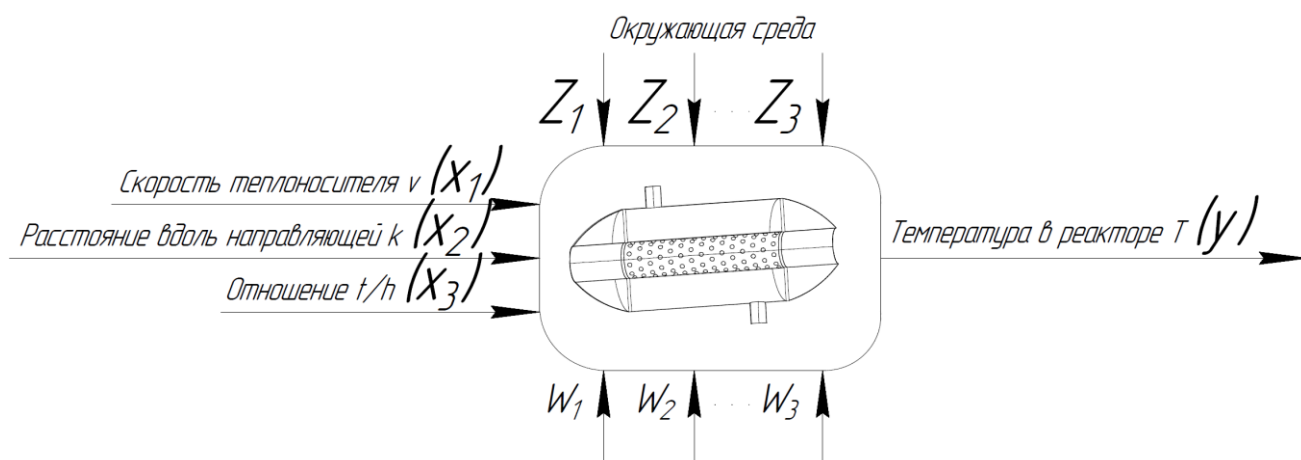


Рисунок 46 – Схема обозначения входных и выходных параметров для исследования процесса термической деструкции в реакторном агрегате с термоконтактной поверхностью теплообмена

Таблица 5 – Распределение значений входных и выходных параметров

Параметры	Переменная	Диапазон значений	
		От	До
Входные	Скорость теплоносителя v , м/с	1	5
	Расстояние вдоль направляющей k , мм	5,7	16,2
	Отношение t/h	6,67	20
Выходные	Температура в реакторе T , °C	510,0	640,4

В результате проведенного анализа было установлено, что коэффициент множественной корреляции построенной модели (*Multiple R*) равен 0,999, что говорит о весьма высокой связи между исследуемыми факторами. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,999$. Значение данного параметра свидетельствует о том, что 99,9 % вариации переменной «температура в реакторе» объясняется вариацией переменных «скорость теплоносителя», «расстояние вдоль направляющей» и «отношение t/h ». Остальные 0,1 % приходятся на долю других неучтенных факторов. Скорректированный коэффициент детерминации (*Adjusted R²*) равен 0,999. Значение критерия Фишера (F) в данном случае равняется 4529,7. При сравнении фактического и табличного значения (3,03 при $\alpha = 0,05$) критерия Фишера можно сделать вывод об отклонении нулевой гипотезы ($F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$). Связь между выходным и входными параметрами существенна, а уравнение регрессии является статистически значимым. Уровень значимости $p = 0,00$ говорит о значимости регрессии в целом.

Закодированное уравнение регрессии (20) исследуемой модели выражает зависимость выходного параметра от входных параметров, а коэффициенты уравнения показывают количественное воздействие каждого фактора на результирующий показатель при неизменности других.

$$y = 563,911 + 48,398X_1 - 2,476X_2 - 5,45X_3 + 0,167X_1X_2 + 0,309X_1X_3 + 0,05X_2X_3 - 5,432X_1^2 + 0,018X_2^2 + 0,094X_3^2, \quad (20)$$

где y – функция отклика (температура в реакторе T); X_1, X_2, X_3 – факторы варьирования, X_1 – скорость теплоносителя v , X_2 – расстояние вдоль направляющей k , X_3 – отношение t/h .

Для определения значимости коэффициентов уравнения регрессии воспользуемся диаграммой Парето (рисунок 47). Из ее анализа становится ясно, что статистически незначимыми являются эффекты X_2^2 и X_2X_3 . Ввиду этого можем принять нулевую гипотезу и исключить переменные X_2^2 и X_2X_3 из уравнения регрессии.



Рисунок 47 – Диаграмма Парето

Согласно проведенному анализу, запишем уравнение регрессии в раскодированном виде без учета незначимых коэффициентов:

$$y(T) = 563,911 + 48,398v - 2,476k - 5,45t/h + 0,167vk + 0,309vt/h - 5,432v^2 + 0,094(t/h)^2, \quad (21)$$

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

Для проверки точности полученной модели произведем сравнение значений температуры в реакторе T , полученных при моделировании и с использованием уравнения регрессии (21) на примере термоконтактной поверхности с полусферическими выступами высотой 2 мм (рисунок 48). Расчет погрешности осуществим по выражению $(T_{\text{мод}} - T_{\text{рег}} / T_{\text{мод}}) \cdot 100 \%$, где $T_{\text{мод}}$ и $T_{\text{рег}}$ – это температура в реакторе, полученная с помощью моделирования и уравнения регрессии. В результате получаем, что погрешность составляет 0,05 – 1,01 %. Это говорит о высокой точности получаемых с помощью уравнения регрессии значений.

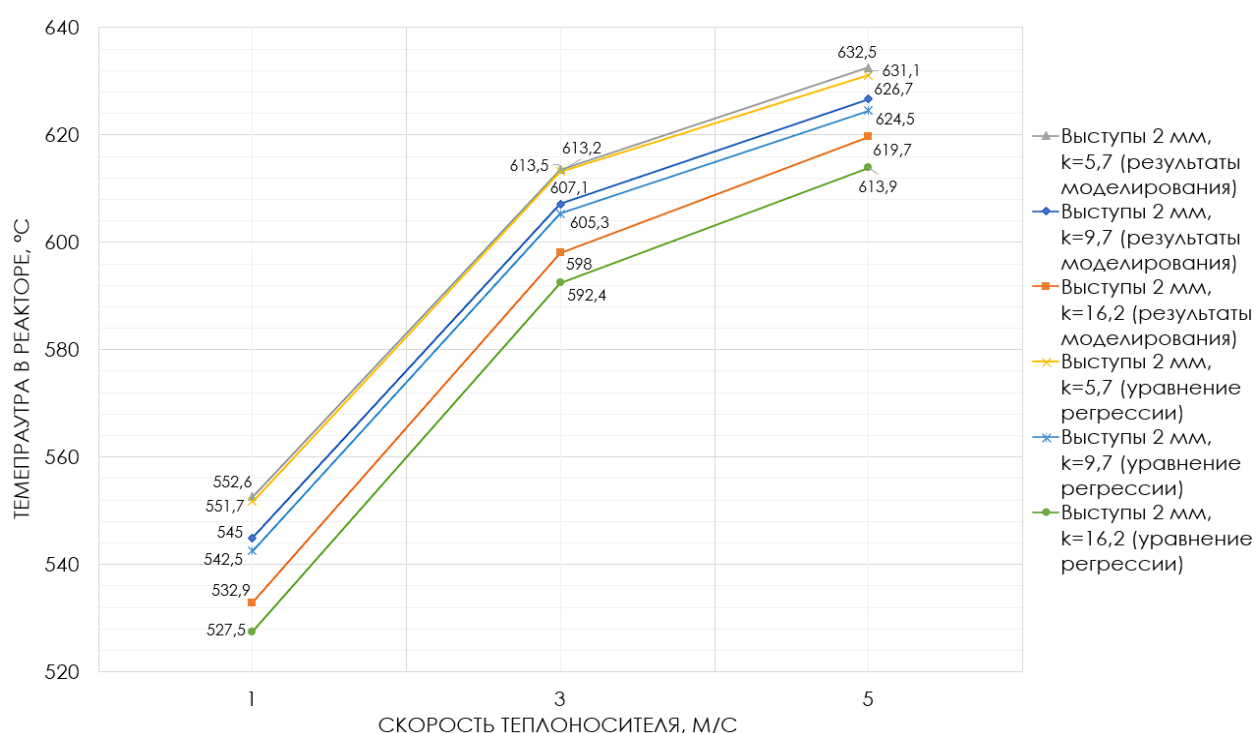


Рисунок 48 – Сравнение зависимостей изменения температуры в реакторе

Проверку адекватности модели произведем путем анализа регрессионных остатков. Для этого построим диаграмму рассеяния наблюдаемых и предсказанных значений и нормальный вероятностный график остатков модели. Анализируя график, представленный на рисунке 49, сделаем вывод, что модель является адекватной, так как полученные значения практически находятся на прямой линии и имеют минимальное отклонение. На нормальном вероятностно графике (рисунок 50) ситуация аналогичная. Отклонение точек от прямой незначительно, что позволяет сделать вывод о нормальности остатков.

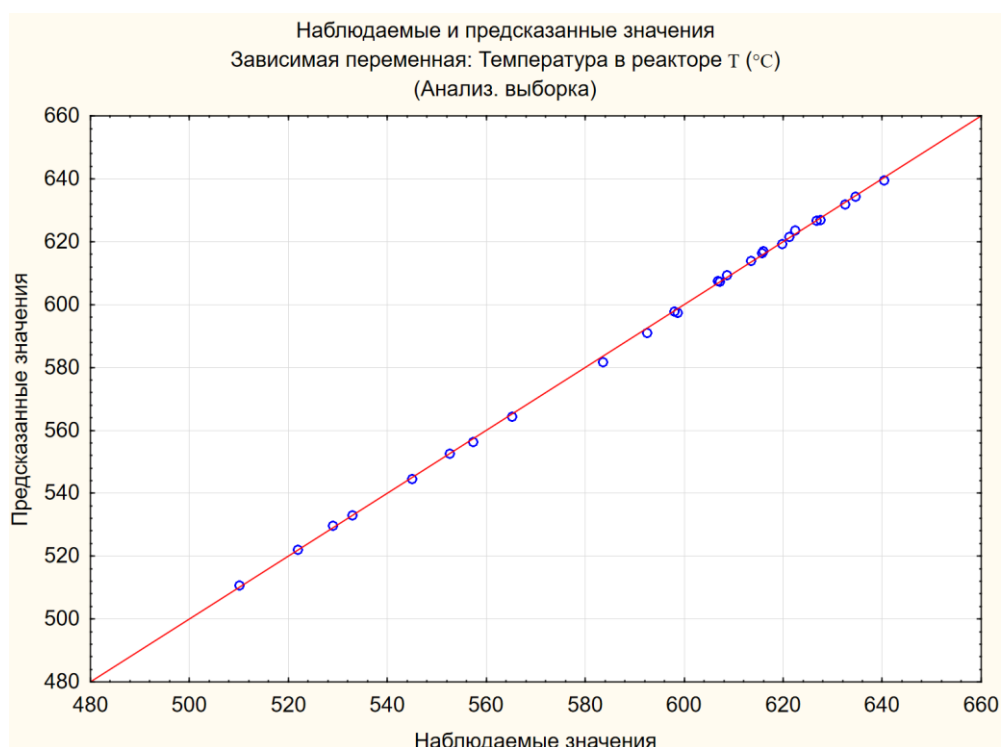


Рисунок 49 – Диаграмма рассеяния наблюдаемых и предсказанных значений

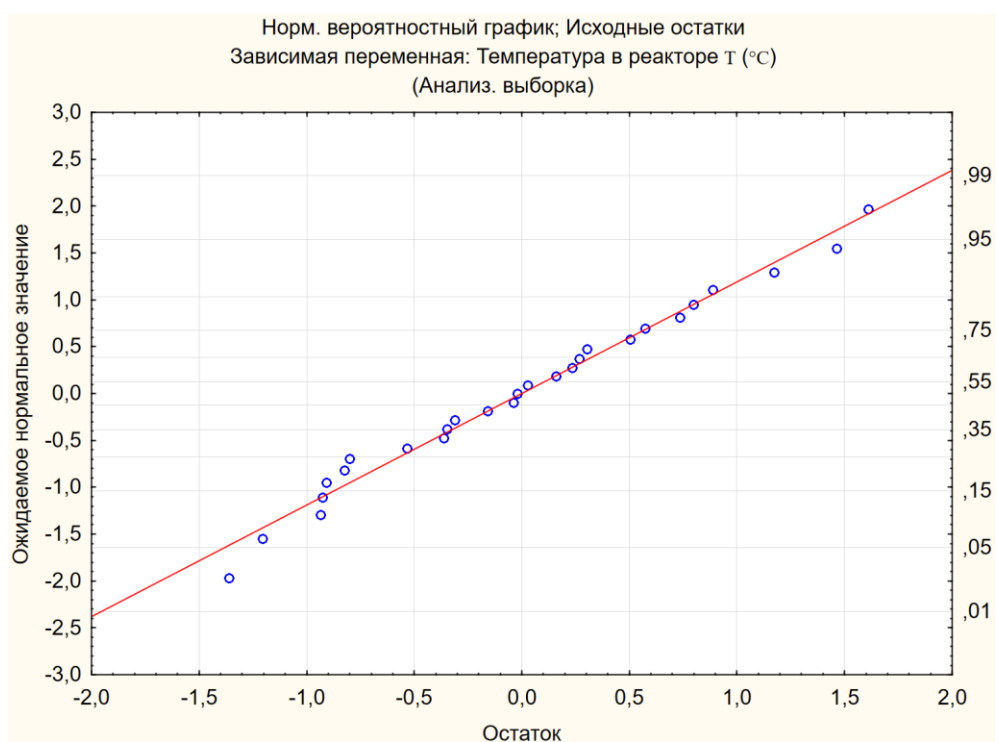


Рисунок 50 – Нормальный вероятностный график остатков модели

В качестве инструмента, используемого для оптимизации конструктивно-технологических и режимных параметров реакторного агрегата, будем использовать построение профилей желательности. Профили желательности для

установленных факторов представлены на рисунке 51. Наиболее предпочтительные значения независимых переменных изображены красными линиями в нижней части рисунка 51. В верхнем правом углу изображен график функции желательности. Точка 0 показывает наименее желательное значение, точка 5 – среднее значение, а точка 1 – наиболее желательное значение. Установим значения факторов на определение наиболее оптимального среднего значения. При этом получаемое значение должно соответствовать температуре процесса низкотемпературной термической деструкции (до $\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$). Параметры кривизны функции желательности установим равной 0,5 для верхней и нижней линий. В результате построения получаем, что для скорости течения теплоносителя наиболее оптимальным значением является $v = 3\text{ м/с}$. Расстояние вдоль направляющей должно составлять $k = 10,533\text{ мм}$, а отношение расстояния между выступами вдоль образующей к высоте выступов $t/h = 12,223\text{ мм}$. Температура в реакционной камере реакторного агрегата при этом составляет $T = 600,87\text{ }^{\circ}\text{C}$.

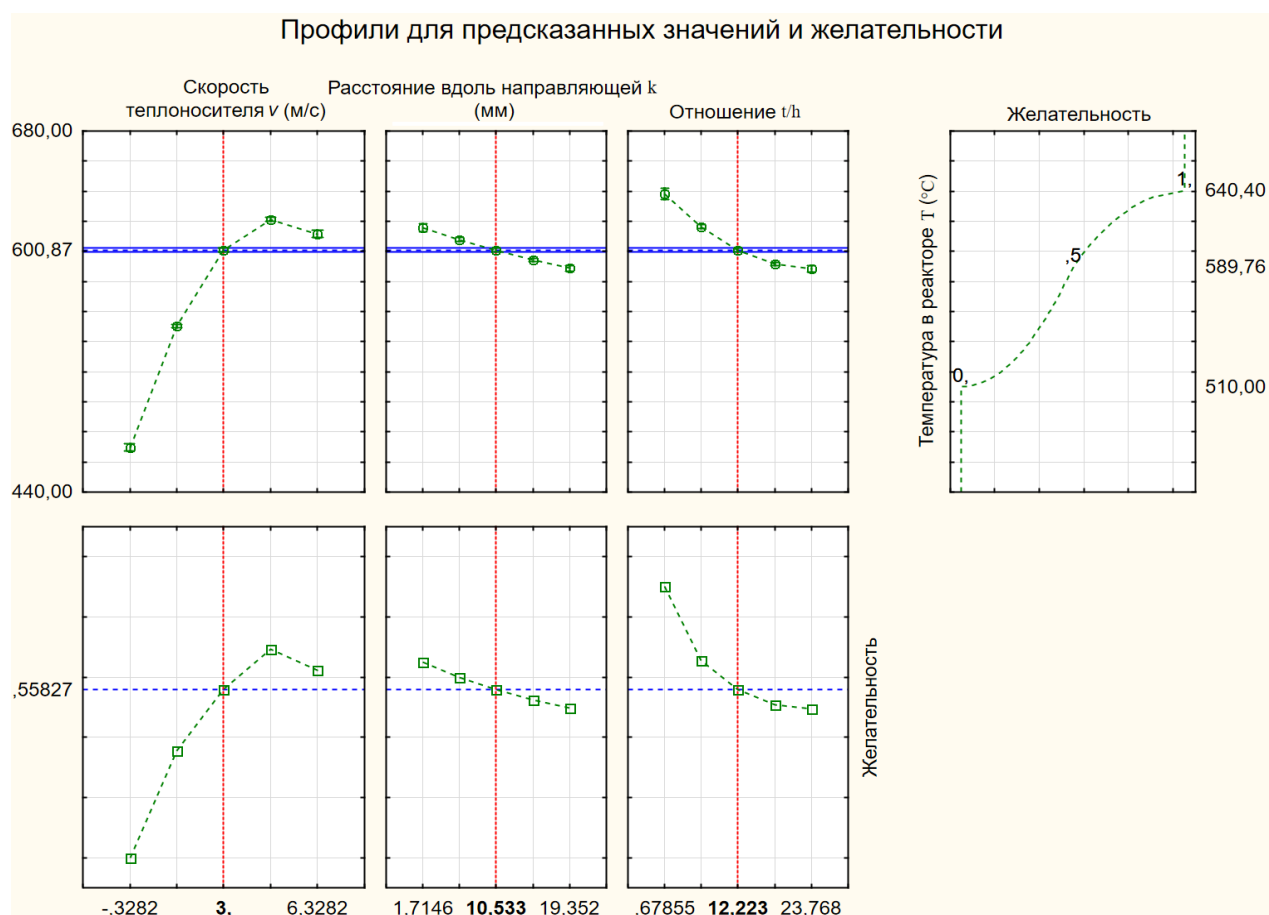


Рисунок 51 – Профили желательности

2.4 Определение режимных параметров формирования термоконтактной поверхности корпуса реакторного агрегата

Согласно разработанной технологии модернизации реакторных агрегатов, на первом этапе необходимо сформировать термоконтактную поверхность, взаимодействующую со средой. Для определения требуемого контактного давления, обеспечивающего необходимую глубину внедрения профильного инструмента, следует определить вид возникающей деформации, силу для образования данной поверхности и перемещения материала.

Рассмотрим листовый материал 1, находящийся под действием индентора 2 произвольной формы, на котором необходимо сформировать термоконтактную поверхность (рисунок 52). Вначале формообразования листовый материал находится в плоском напряженном состоянии при следующих условиях: $\sigma_y = 0$, тогда $\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0$, следовательно, ось y будет являться главной.

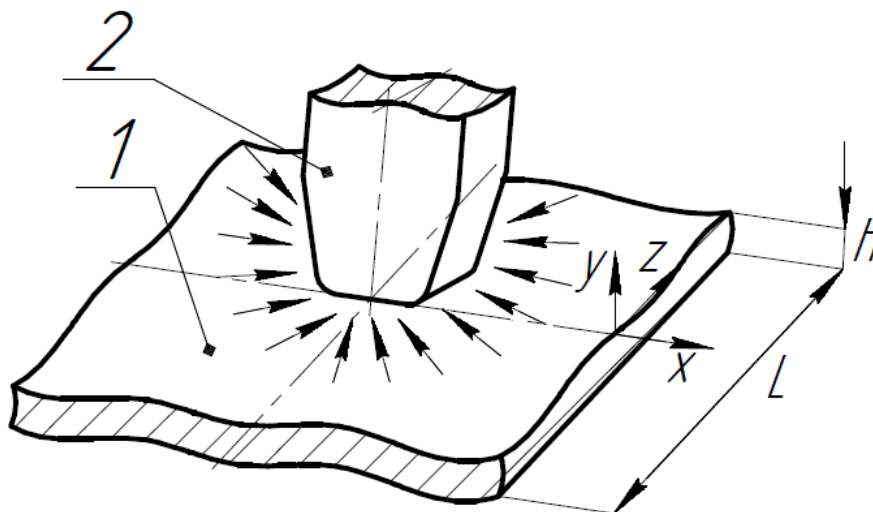


Рисунок 52 – Схема плоского напряженного состояния при формообразовании

Далее определим возникающие напряжения на наклонной площадке, которая в данном случае является параллельной оси y и отсекает отрезки на осях x и z (рисунок 53). Введем обозначение угла между нормалью к наклонной площадке и

к оси x через φ , тогда значения направляющих косинусов нормали примут следующий вид: $a_x = \cos\varphi$, $a_y = 0$, $a_z = \sin\varphi$.

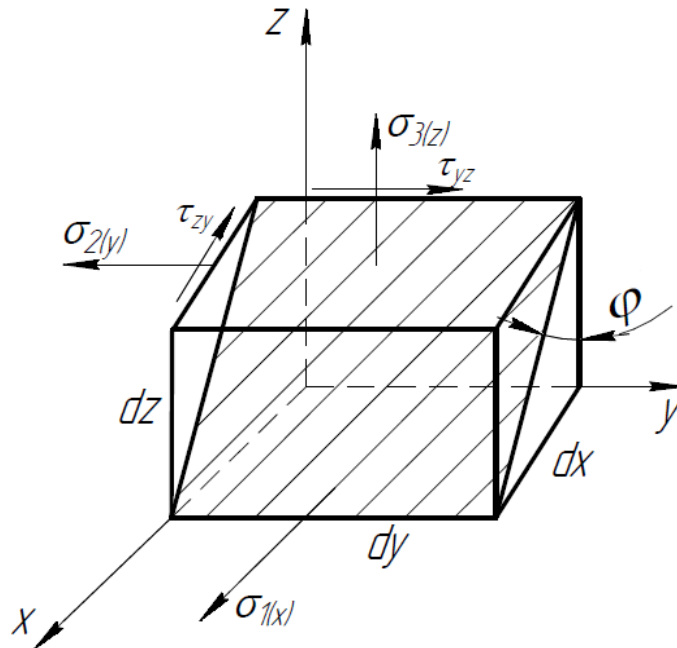


Рисунок 53 – Схема расположения наклонной площадки на материальной частице в виде параллелепипеда

Решая задачу при данных условиях, получим следующие уравнения для нормальных и касательных напряжений:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \cos 2\varphi + \tau_{xz} \sin 2\varphi; \quad (22)$$

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_3 \sin^2 \varphi; \quad (23)$$

$$\tau = \pm \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \sin 2\varphi - \tau_{xz} \cos 2\varphi. \quad (24)$$

В главных напряжениях:

$$\sigma_n = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} + \cos 2\varphi \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}; \quad (25)$$

$$\tau = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\varphi. \quad (26)$$

Из уравнения (25) можно сделать вывод, что касательные напряжения достигают максимального значения при значении $\varphi = 45^\circ$:

$$\tau_{\max} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}. \quad (27)$$

Тогда тензор напряжений для плоского напряженного состояния в главных напряжениях будет иметь следующий вид [119]:

$$T_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ . & 0 & 0 \\ . & . & \sigma_3 \end{pmatrix}. \quad (28)$$

При условии расположения наклонной площадки так, что напряжение S совпадает с направлением нормали N (рисунок 54), имеем следующее: касательное напряжение на площадке станет равным нулю ($\tau = 0$), а направление нормали станет главным направлением, напряжение S при это будет равным σ_n ($S = \sigma_n$) [120].

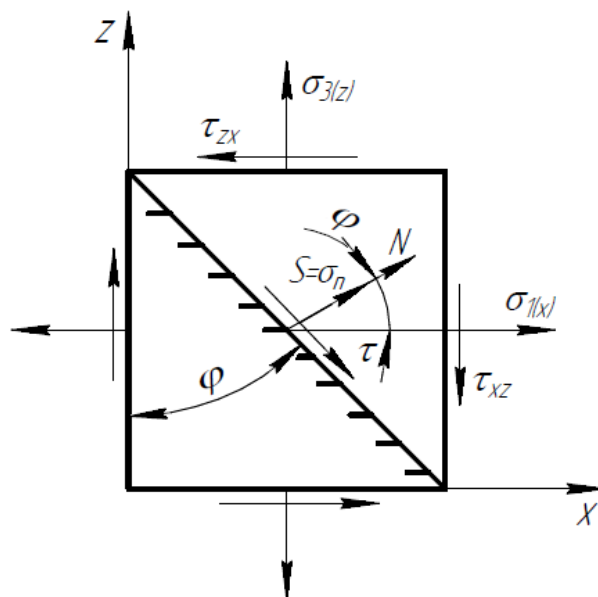


Рисунок 54 – Схема расположения наклонной площадки, при котором направление нормали станет главным направлением

Согласно принятым условиям, находим главные нормальные напряжения σ_1 и σ_3 , выраженные через напряжения в произвольных осях:

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2}. \quad (29)$$

При этом среднее напряжение примет следующий вид:

$$\sigma_{cp} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{3}. \quad (30)$$

Девииатор напряжений можно записать следующим образом [119]:

$$D_\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 - \sigma_{cp} & 0 & 0 \\ \cdot & -\sigma_{cp} & 0 \\ \cdot & \cdot & \sigma_3 - \sigma_{cp} \end{pmatrix}. \quad (31)$$

Анализируя выражения (28) и (31), сделаем вывод о том, что в главных напряжениях схема тензора напряжений плоская, при этом схема девиатора в общем случае объемная. В случае обращения напряжения в нуль схема девиатора изменяется в плоскую. Это, в свою очередь, возможно только при равенстве абсолютных значений главных напряжений (σ_1 и σ_3) и разных их знаках.

Используя условие неразрывности, а также выражение [119]

$$\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad (32)$$

а также выражение, отражающее связь между деформациями и напряжениями (где G' – модуль пластичности второго рода) [121]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{2G'}(\sigma_x - \sigma_{cp}); \varepsilon_y = \frac{1}{2G'}(\sigma_y - \sigma_{cp}); \varepsilon_z = \frac{1}{2G'}(\sigma_z - \sigma_{cp}); \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G'}\tau_{xy}; \gamma_{yz} = \frac{1}{G'}\tau_{yz}; \gamma_{zx} = \frac{1}{G'}\tau_{zx}. \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

Приняв $\varepsilon_y = 0$, устанавливаем, что напряжение по оси y должно равняться гидростатическому:

$$\sigma_y = \sigma_{cp} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \text{const.} \quad (34)$$

Решая предыдущее уравнение (34) относительно σ_y , получим следующее:

$$\sigma_y = \frac{(\sigma_x + \sigma_z)}{2}. \quad (35)$$

Ввиду того, что σ_y является постоянной величиной, значит это напряжение будет являться одним из главных, а ось y , в данном случае, главным направлением, где касательные напряжения будут равны: $\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0$ [120].

Поскольку напряженное состояние в различных точках тела не зависит от координаты y (вдоль которой нормальное напряжение σ_y постоянно), наклонная площадка тетраэдра заменяется площадкой, параллельной оси y . Таким образом, все сделанные выводы относительно нормального и касательного напряжения будут справедливы и для плоского деформированного состояния [119].

Главные напряжения (σ_1 и σ_3) определяются из уравнения (29), а σ_2 станет равным:

$$\sigma_2 = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2}. \quad (36)$$

Так как при плоском деформированном состоянии $\sigma_y = \text{const}$, а $\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0$, то условия равновесия для этого случая одинаковы с условиями равновесия для плоского напряженного состояния. Одинаковы также будут выражения зависимости деформаций от перемещений и условий неразрывности.

Таким образом, плоское напряженное состояние возникает, когда напряжение по одной из осей является незначительным и им можно пренебречь. Для плоского деформированного состояния относительная деформация, возникающая в направлении одной из осей, параллельной большему размеру, будет мала, и ей можно пренебречь. В случае образования термоконтактной поверхности относительная деформация в направлении длины и ширины листа мала. Процесс деформирования можно рассматривать в плоскости, перпендикулярной оси формообразующего инструмента.

Исходя из представленной технологии, формообразующий инструмент выдавливает часть металла в заранее подготовленное углубление (лунку), образующее собой круговой контур. Таким образом, при отдельном выдавливании единичным инструментом предполагаем, что возникающее воздействие направлено на круглую пластинку. При этом границы кругового контура являются опорными для металлического листа поверхностями, ограничивая тем самым зону деформации.

Основываясь на данных доводах, необходимое усилие для формообразования будем находить через величину прогиба части металлического листа. Для этого зададимся условиями равновесия элемента листа (рисунок 55). Из рисунка 55 следует, что элемент листа ограничивается двумя радиальными сечениями, угол между которыми равен $d\phi$, и двумя дуговыми сечениями, одно из которых расположено по окружности радиуса r , а второе – на окружности радиуса $r + dr$. По окружным и диаметральному сечениям также действуют изгибающие моменты M_r и M_ϕ , отнесенные к единице длины. Q является поперечной силой, действующей в дуговом сечении. Вектор-моменты обозначены объемными стрелками. Крутящие моменты отсутствуют, а поперечная сила в радиальном сечении равна нулю [122].

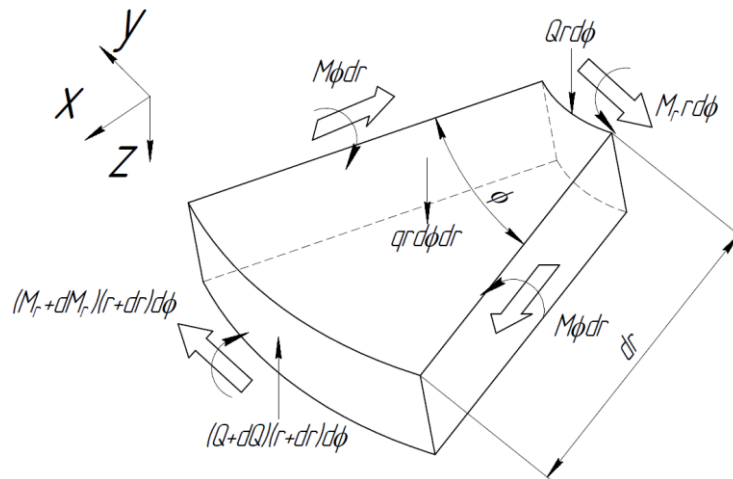


Рисунок 55 – Условия равновесия элемента листа

Исходя из заданных условий, уравнение равновесия примет следующий вид:

$$D \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\omega}{dr} \right) \right] = \frac{1}{r} \int_0^r q r dr. \quad (37)$$

Принимая во внимание тот факт, что формообразующий инструмент в различный момент времени формообразования находится в различной точке элемента листа, считаем, что осуществляется несимметричный изгиб элемента листа. Ввиду этого уравнение (37) примет следующий вид [123]:

$$\Delta \omega = \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2}{d\theta^2} \right) \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2}{d\theta^2} \right) \omega = \frac{q}{D}. \quad (38)$$

Откуда $\Delta \omega$ определится как:

$$\Delta \omega = \frac{d^2 \omega}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\omega}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2 \omega}{d\theta^2}, \quad (39)$$

где Θ, r – полярные координаты точки пластины; ω – прогиб пластины, мм; q – интенсивность действующей поперечной нагрузки, Н/мм²; $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ –

цилиндрическая жесткость, Н·мм; E – модуль Юнга металла, Н/мм²; h – толщина листа, мм; ν – коэффициент Пуассона.

Решая уравнение (38) при условии действия сосредоточенной силы P , приложенной в любой точке пластины, получим следующее выражение:

$$\omega = \frac{Pa^2}{16\pi D} (1 - \beta^2)^2, \quad (40)$$

где P – сила, необходимая для формообразования, Н; $\beta = b/a$ коэффициент отношения расстояния приложенной силы и размеров участка листа; b – расстояние от центра участка листа до места приложения сосредоточенной силы, мм; a – расстояние от центра пластины до края опоры, мм (рисунок 56).

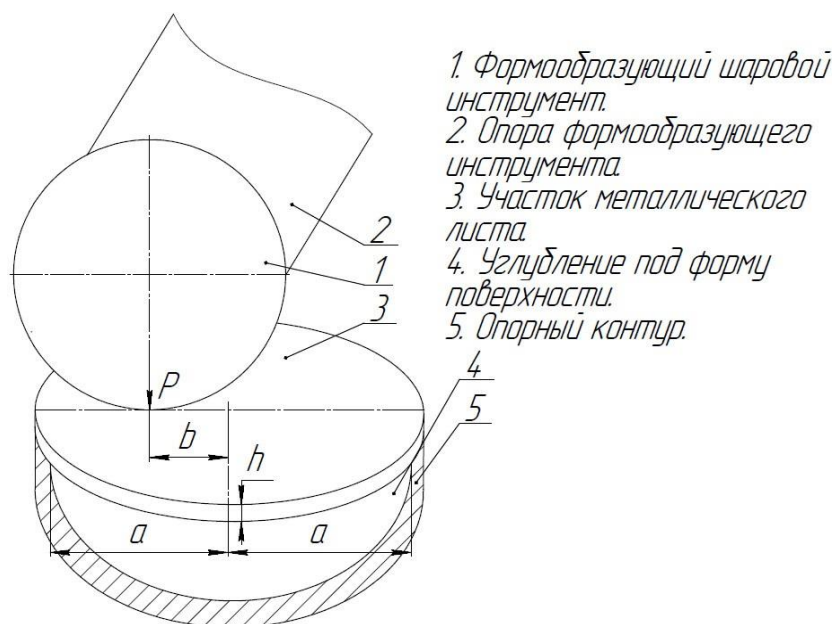


Рисунок 56 – Схема определения прогиба в любой точке листа

Как говорилось ранее, при совершении барабаном движения с постоянной угловой скоростью ω и передаче через него усилия P металлическому листу происходит внедрение профильного инструмента с формообразованием термоконтактной поверхности. Сам процесс формообразования и возникающие при этом силы, а также их направление можно представить схематично на рисунке

57. Исходя из представленного рисунка, силу трения можно определить с помощью следующего уравнения:

$$F_{\text{тр}} = P \cos \varphi. \quad (41)$$

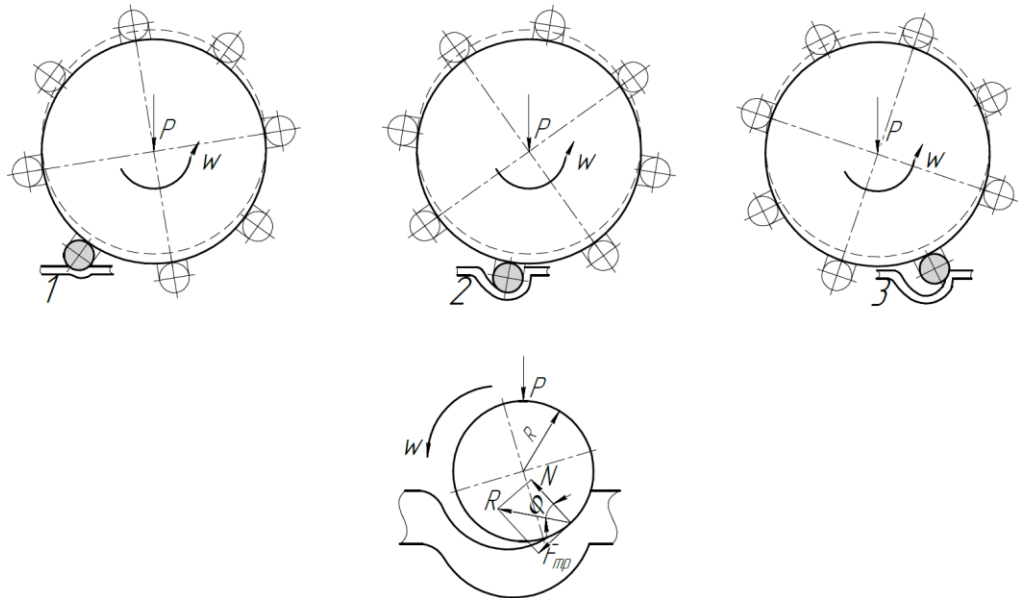


Рисунок 57 – Силы, возникающие при формообразовании

При образовании термоконтактной поверхности в промышленных масштабах целесообразно использовать смазочные материалы. Смазка способствует снижению трения в процессе формообразования, минимизации образования различных дефектов (рисок, задигов и др.), а также обеспечивает сохранность рабочего инструмента и снижение силы образования данной поверхности [124–126].

Эффективную площадь контакта, образуемую путем формообразования, можно определить по следующему выражению:

$$S_{\text{эф}} = S_{\text{ф}} N, \quad (42)$$

где $S_{\text{ф}}$ – площадь образуемой геометрической фигуры, мм^2 ; N – количество образуемых фигур.

Эффективную площадь контакта необходимо сравнивать с общей площадью для оценки вовлеченности площади контакта в работу. В данном случае общая площадь будет находиться как площадь ограниченного наибольшим и наименьшим диаметрами высшей и низшей точки высот образуемых фигур.

2.5 Обработка поверхности и ее влияние на характер клеевого соединения

Второй этап модернизации реакторных агрегатов заключается в фиксации термоконтальной поверхности на внутренней поверхности корпуса. Ввиду этого необходимо определить влияние поверхностного слоя деталей при их соединении, так как это может отразиться на эксплуатационных свойствах агрегатов [127].

По данным работ авторов [128–130] полезным параметром поверхностного слоя, приводящим к увеличению прочности клеевого соединения, является параметр шероховатости. Возрастание прочности клеевого соединения обусловлено тем, что увеличивается контактная площадь, а также образуется механическое зацепление на границе раздела фаз (образование адгезионных связей). При этом необходимо понимать, что шероховатость должна быть однородной (без резких впадин и выпуклостей) по всей контактной поверхности во избежание развития трещин и снижения прочности [131]. Шероховатость относится к конструктивным факторам, которые определяют качество клеевого соединения. Различают также технологические факторы (давление, температура и время отверждения) и факторы адгезионного взаимодействия (энергия взаимодействующих фаз, растекание, смачивание и др.).

Таким образом, с точки зрения технологии основная задача исследования заключается в определении оптимальной системы параметров качества поверхности склеиваемых деталей.

С целью обеспечения качества поверхностного слоя детали выделяют два способа формирования шероховатости: механическую и химическую обработки. В зависимости от вида обработки образуемая микрогеометрия определяется тремя основными параметрами: высотой (Ra , Rz , Rp , R_{max}), шагом (Sm) и формой [132].

Как и любая другая жидкость, клеевая композиция подвержена поверхностным явлениям, возникающим при соприкосновении капли адгезива с твердой поверхностью, называемым смачиванием. Смачивание идеальных поверхностей отличается от смачивания шероховатых поверхностей и определяется параметрами (краевого угла Θ , работы адгезии W_a , критического поверхностного натяжения γ), определяющими фактическую площадь контакта капли с шероховатой поверхностью. Фактическая площадь зависит от высоты и ширины основания выступов, их частоты и прочих величин, определяющих микропрофиль твердого тела [133–134].

Рассмотрим смачивание капли жидкости твердой шероховатой поверхности (рисунок 58). Из рисунка 58 следует, что микрогеометрия поверхности приводит к увеличению фактической площади контакта жидкости с шероховатой поверхностью, в сравнении с гладкой поверхностью [135]. Формульное выражение, определяющее коэффициент фактического увеличения площади контактной поверхности K , можно выразить следующим образом:

$$K = \frac{S_{\text{III}}}{S_r}, \quad (43)$$

где $S_{\text{ш}}$ – площадь контакта шероховатой поверхности, мм^2 ; $S_{\text{г}}$ – площадь контакта гладкой (номинальной) поверхности, мм^2 .

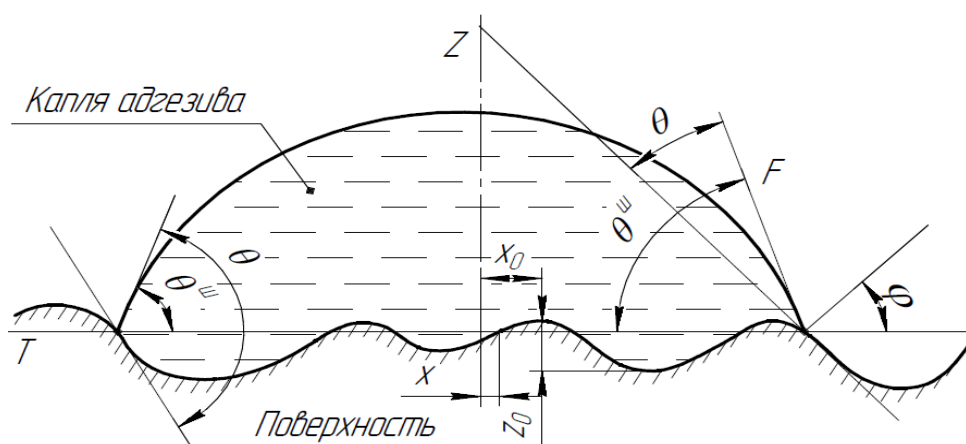


Рисунок 58 – Капля адгезива на твердой шероховатой поверхности

Анализ смачивания заключается в установлении равновесного макрокраевого угла $\Theta_{\text{ш}}$ от коэффициента K . Данное условие равновесия на шероховатой поверхности выражается уравнением Венцеля – Дерягина [136]:

$$\cos \theta^{\text{ш}} = K \cos \theta, \quad (44)$$

где $\Theta^{\text{ш}}$ и Θ – краевые углы шероховатой и гладкой поверхности соответственно.

Из условия равновесия (44) следует, что увеличение коэффициента K ($K > 1$) приводит к увеличению работы адгезии шероховатой поверхности $W_a^{\text{ш}}$ по сравнению с работой адгезии W_a на гладкой поверхности. Отсюда можно сделать вывод, что формирование шероховатости на склеиваемых объектах обуславливает увеличение прочности клеевого соединения. Связь между работой адгезии W_a и краевым углом Θ смачивания выражается уравнением Дюпре – Юнга [137]:

$$W_a = \gamma(1 + \cos \theta). \quad (45)$$

Как упоминалось выше, форма образуемой шероховатости влияет на характер клеевого соединения. Так, автор работы [138] установил условие растекания адгезива в зависимости от краевого угла $\Theta^{\text{ш}}$ и коэффициента K под действием силы тяжести:

$$\begin{aligned} \frac{\cos \theta^{\text{ш}}}{K} - 1 &> 0; \\ \frac{\cos \theta^{\text{ш}}}{K} &> 1. \end{aligned} \quad (46)$$

При этом, рассматривая растекания адгезива вдоль канавки шероховатости (рисунок 59), должно осуществляться следующее условие, при этом угол φ_y должен быть больше значения $180^\circ - 2\Theta$, в противном случае растекание будет невозможным [138–140]:

$$\sigma_{\text{тг}} > \gamma_{\text{тж}} + \sigma_{\text{жг}} \cdot \sin \frac{\varphi_y}{2}, \quad (47)$$

где $\sigma_{\text{тг}}$ – поверхностное натяжение твердое тело – жидкость, Н/м; $\gamma_{\text{тж}}$ – поверхностное натяжение жидкость–газ, Н/м; $\sigma_{\text{жг}}$ – поверхностное натяжение твердое тело – газ, Н/м.

Поверхностные натяжения для шероховатых поверхностей находятся путем умножения величины конкретного поверхностного натяжения на коэффициент K :

$$\sigma_{\text{тг}}^{\text{ш}} = K\sigma_{\text{тг}}; \sigma_{\text{жг}}^{\text{ш}} = K\sigma_{\text{жг}}; \gamma_{\text{тж}}^{\text{ш}} = K\gamma_{\text{тж}}. \quad (48)$$

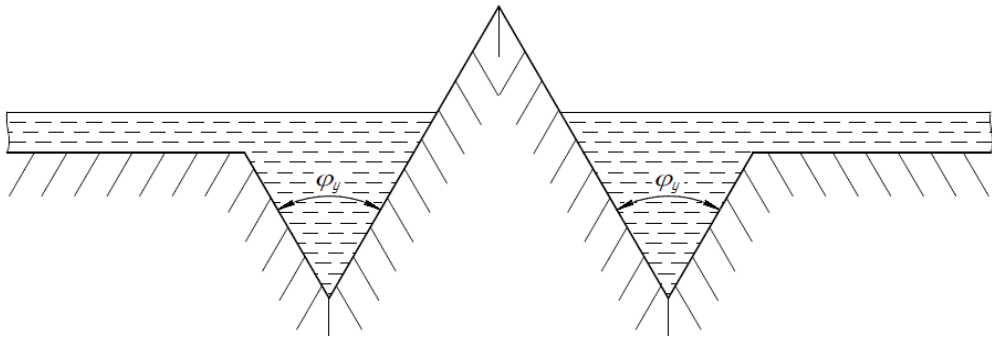


Рисунок 59 – Растекание жидкости вдоль канавки образуемой шероховатости

Следовательно, при соотношении углов $\varphi_y < \Theta^{\text{ш}}$ адгезив может осуществлять движения равномерно (без задержек), а при $\varphi_y > \Theta^{\text{ш}}$ движение адгезива имеет скачкообразный характер, что объясняется возникновением явления гистерезиса [141, 142].

Упомянутые ранее технологические факторы отражают свое влияние на адгезионную прочность, определяемую через шероховатую поверхность контакта. Предложенная В.Е. Гулем микрореологическая теория [143] отражает данную взаимосвязь следующим образом:

$$S_{\text{ш}} = K \sqrt{\frac{pt}{\eta}}, \quad (49)$$

где p – давление, Па; t – время контакта, с; η – коэффициент вязкости расплава.

Коэффициент вязкости расплава, в свою очередь, определяется следующим образом:

$$\eta = \eta_0 \exp \frac{E}{RT}, \quad (50)$$

где η_0 – начальная вязкость адгезива, Па·с; E – модуль Юнга, Па; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура контакта, К.

При рассмотрении указанных выражений можно сделать вывод, что оптимальные (так как зависимы нелинейно) значения параметров давления p , времени контакта t и температуры T позволяют добиться полного заполнения шероховатой поверхности, что обеспечит лучшее клеевое соединение. Параметр температуры T прямо влияет на параметр вязкости адгезива η_0 , а также на скорость кристаллизации адгезива [144]. При определенном времени контакта адгезив перестанет заполнять неровности поверхностного слоя под действием силы тяжести, поэтому управление параметрами давления p позволит контролировать процесс растекания адгезива [145, 146].

Выступы шероховатости и угол их наклона также оказывают сопротивление на растекание адгезива вдоль поверхности смачивания. Ввиду этого целесообразно, чтобы направление нанесения клеевой композиции совпадало с направлением угла наклона шероховатости [147, 148]. Растекание клеевой композиции по впадинам шероховатости осуществляется лучше, чем по гладкой поверхности, за счет капиллярного эффекта. При этом в случае отличия краевого угла от 0 клеевая композиция может не заполнять дно канавки полностью (скачкообразное течение). В случае полного смачивания не происходит захвата газа в образованных канавках шероховатости [149].

Как упоминалось ранее, для формирования шероховатой поверхности используют механические и химические способы обработки поверхностного слоя

детали. Обработку металлических листов и конструктивно несложных объектов целесообразно проводить пескоструйным и ручным (шлифование) методами [150].

После механической обработки деталей, придания шероховатости, производится подготовительная обработка поверхностей перед склеиванием – обезжиривание. Перед началом обезжиривания поверхности промывают в проточной воде комнатной температуры (15–25 °С) с дальнейшим высушиванием. В предложенной технологии для производства двухэлементного корпуса реакторного агрегата используется нержавеющая сталь. Лучшим обезжиривающим средством для стальных деталей является трихлорэтилен. Для обезжиривания стали также может применяться перхлорэтилен и тетрахлорметан. В случае необходимости использования материалов из алюминия и меди в качестве обезжиривателя применяют тетрахлорэтилен и щелочные растворы (KOH, K_2SiO_3 и др.) с ПАВ для меди соответственно. Универсальными обезжиривателями для любых материалов являются технический бензин, уайт-спирит и эмульсионные обезжириватели (например, ЮНИКЛИН 200) [151–153].

Для ускорения процесса обезжиривания и повышения его эффективности также применяют ультразвуковое и электролитическое обезжиривание. Первую разновидность обезжиривания целесообразно использовать для маленьких деталей со сложной геометрией [154], вторую – для больших и несложных в плане конструкции деталей. Универсальный рецепт ванны для обезжиривания различных металлов представлен в таблице 6 [155].

Таблица 6 – Универсальная ванна для электролитического обезжиривания различных металлов

Состав	Применение
Водный раствор: 15 г/л едкого натра;	Возможно обезжиривание стали, чугуна и цветных металлов. Рабочая температура
30 г/л углекислого натрия; 55 г/л фосфата натрия кристаллического.	находится в диапазоне 60–80 °С, напряжение 6–10 В. Плотность тока составляет 5–7 А/дм ² .

После операции обезжиривания производится промывка и сушка обезжиренных поверхностей перед нанесением клеевой композиции. Промывка осуществляется с помощью горячей воды температурой 60–70 °С. Далее осуществляется сушка одним из следующих способов [156]:

1. Обдув сухим сжатым воздухом (температура 100–120 °С) с последующей выдержкой в сушильных шкафах.

2. Обдув сухим сжатым воздухом (температура 110–120 °С) после выдержки в масле с выдержкой на воздухе или обдувом до полного высыхания.

К химическому способу формирования шероховатости относится травление. В отличие от механической обработки травление осуществляется после операции обезжиривания с последующей промывкой и сушкой либо как вторичная обработка для повышения качества поверхностного слоя в виде увеличения класса шероховатости [157]. Осуществляют травление в кислотных (H_2SO_4 , HCl , HNO_3) и щелочных (NaOH , NaNO_3 , NaN) растворах [144]. В промышленных масштабах преимущество отдается применению кислотного травления ввиду относительной простоты и дешевизны процесса (таблица 7) [159, 160].

Таблица 7 – Рецепт для травления нержавеющей стали

Рецепт раствора	Характеристика
Серная кислота ($\rho = 1840 \text{ кг/м}^3$, 100 г/л), соляная кислота (37 %, 100 г/л), фтористоводородная кислота ($\rho = 1140 \text{ кг/м}^3$, 4 г/л)	Использование H_2SO_4 или $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HCl}$ отличается дешевизной и низким выделением паров. Использование HCl отличается лучшей обработкой поверхности
Серная кислота ($\rho = 1840 \text{ кг/м}^3$, 100 г/л), соляная кислота (37 %, 100 г/л), дихромат натрия (10 г/л), вода (30 мл)	
Соляная кислота ($\rho = 1840 \text{ кг/м}^3$, 100 г/л, в том числе 4 г/л перекись водорода, 20 г/л формалина, 90 г/л вода)	

2.6 Определение технологических параметров для склеивания двухэлементного корпуса реакторного агрегата

Для обеспечения оптимального качества склеиваемых поверхностей необходимо установление оптимальных значений технологических параметров процесса склеивания.

Одним из ключевых параметров технологии склеивания является параметр шероховатости. В работах авторов [161, 162] приводится оптимальное значение шероховатости при склеивании различных деталей, находящееся в диапазоне $R_z = 6,3\text{--}20$ мкм. Авторы работы [163] установили более точный диапазон шероховатости, равный $R_a = 2,5\text{--}5$ мкм. При этом снижение или увеличение данного диапазона шероховатости приводит к уменьшению прочности клеевого соединения. Эти значения характерны при склеивании нецилиндрических деталей, например: при склеивании замка теплообменного элемента (рисунок 36) или вспомогательных деталей реакторного агрегата.

Для склеивания между собой цилиндрических поверхностей диапазон шероховатости становится меньше. Данной технологии сборки цилиндрических соединений посвящено множество работ. Так, в исследовании [164] отмечается оптимальное значение шероховатости $R_a = 1,6\text{--}2,5$ мкм, а в некоторых случаях $R_a = 3,2$ мкм. В другом исследовании [165] отмечается фиксированное значение шероховатости $R_a = 2,5$ мкм. Ввиду этого рекомендуемыми можно считать значения в диапазоне $R_a = 1,6\text{--}3,2$ мкм [166]. Отклонения от данного диапазона способствуют образованию концентраторов напряжений и неполному заполнению поверхностного слоя деталей.

Двухэлементный корпус является наиболее ответственным изделием, при подготовке которого рекомендуется механическая обработка. Коэффициент шероховатости K , определяющий шероховатую площадь контакта (уравнение 42) при клеевом, соединении можно определить с помощью следующих выражений [167]:

$$K = 1 + \frac{8}{3} \left(\frac{Rz_a}{S_{ma}} \right)^2 - \frac{32}{5} \left(\frac{Rz_a}{S_{ma}} \right)^4, \quad (51)$$

$$K = \left(1 + \frac{8}{3} \left(\frac{Rz_a}{S_{ma}} \right)^2 - \frac{32}{5} \left(\frac{Rz_a}{S_{ma}} \right)^4 \right)^2, \quad (52)$$

где уравнение (51) – это коэффициент, рассчитываемый после шлифования; уравнение (52) – это коэффициент, рассчитываемый после пескоструйной обработки; Rz_a – высота микронеровностей, мкм; S_{ma} – средний шаг неровностей, мкм; a – индекс, относящийся к длине склейки.

Другим важным технологическим параметром, определяющим качество клеевого соединения, является зазор (толщина клеевого слоя) между склеиваемыми деталями. Величина данного зазора зависит от химического состава применяемого клея, а также от химического состава самих деталей. Большинство исследований по установлению толщины клеевого слоя показывают, что оптимальными считаются диапазоны 0,1–0,2 мм [168–170] и 0,05–0,25 мм [129, 171]. Данные диапазоны характерны при применении клеев на эпоксидной основе, обладающих меньшей гибкостью (в сравнении с акриловыми). При использовании более эластичных клеевых композиций на основе акрилов диапазон может быть расширен: 0,1–0,5 и 0,03–0,5 мм [172, 173]. По некоторым исследованиям [174–176] считается, что повышение зазора между склеиваемыми деталями (от 1 до 5 мм) при применении эластичных клеев способствует увеличению прочности такого соединения ввиду расхода части энергии на деформацию адгезива.

При данных значениях зазора для цилиндрических соединений важно обеспечивать максимальную соосность склеиваемых деталей, при возможных перекосах происходит снижение прочности соединения на 10–32 % [177].

Толщину клеевого слоя по шероховатой (реальной) площади контактной поверхности необходимо определять по средней линии профиля относительно впадин и выступов шероховатости (рисунок 60).

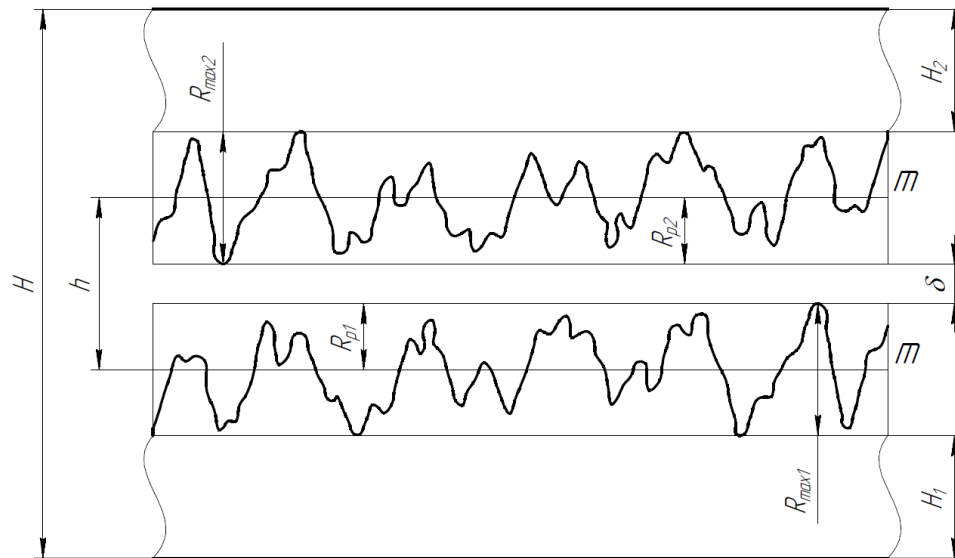


Рисунок 60 – Определение толщины клеевого слоя в соединении деталь – деталь

Толщину клеевого слоя, учитывая профиль шероховатости, можно определить по следующему выражению [178]:

$$h = H - (H_1 + H_2) + R_{p1} + R_{p2}, \quad (53)$$

где H – толщина композиции деталь – клеевой шов – деталь, мм; H_1, H_2 – толщина склеиваемых деталей без учета поверхностного слоя, мм; R_{p1}, R_{p2} – высота нивелирования (сглаживания) склеиваемых поверхностей деталей, мм.

Ввиду работы реакторного агрегата с существенными температурными режимами необходимо учитывать температурное линейное расширение как склеиваемых деталей, так и клеевой композиции. Расчет теплового расширения можно произвести по известной формуле:

$$d = d_0(1 + \alpha \Delta T), \quad (54)$$

где d – диаметр детали или клеевого шва при нагреве, мм; d_0 – первоначальный диаметр детали или клеевого шва, мм; α – коэффициент линейного теплового расширения, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; ΔT – разница температур (конечной и начальной), $^{\circ}\text{C}$.

Прочность клеевого соединения необходимо оценивать путем расчета напряжения на сдвиг. При этом данный расчет аналогичен расчету на срез как паяных, так и сварных соединений [179–181]. Принимая во внимание то, что форма теплообменного элемента повторяет форму корпуса реакторного агрегата, сдвиговое напряжение можно рассчитать следующим образом:

$$\tau_p = \frac{F}{S} \leq [\tau], \quad (55)$$

где F – прилагаемая поперечная сила, Н; S – площадь боковой поверхности цилиндра, мм²; $[\tau]$ – предельно допустимое напряжение, МПа.

Однако сдвиг клеевого шва происходит лишь в пограничном слое, ограничиваясь, видимо, расстоянием от линии впадин до линии выступов на поверхностном слое ($R_{\max}$) [176]. Поэтому при расчете площади боковой поверхности цилиндра лучше учитывать усредненный диаметр клеевого шва – $\delta/2$ (рисунок 60).

При использовании в реакторных агрегатах перемешивающих устройств поток жидкости создает движение внутри реакционной камеры. Ввиду этого жидкость создает усилие, которое может привести к сдвигу теплообменного элемента. В этом случае расчет ведут по равнодействующей сдвигающей силе [181]:

$$F_{\Sigma} = \sqrt{\left(\frac{2T}{d}\right)^2 + F_a^2}, \quad (56)$$

где T – крутящий момент, Н·м; F_a – возникающая осевая сила, Н; d – диаметр сопряжения (по среднему диаметру клеевого шва), м; l – длина соединения, м. При этом должно соблюдаться условие прочности $F_{\Sigma} \leq \pi dl[\tau]$.

Как упоминалось ранее, шероховатость поверхности оказывает сопротивление на течение клеевой композиции. Однако рекомендуемые значения

шероховатости при склеивании являются малой величиной и не влияют на сопротивление клея при его течении. Данные выводы подтверждаются на основе анализа диаграммы А.И. Никурадзе, в работах Г.А. Мурина и практических исследованиях А.В. Игнатова [173, 182, 183]. Таким образом, течение клеевой композиции считается ламинарным. Дополнительные исследования по течению потока газа и жидкости около шероховатой поверхности показывают перемещения пульсирующего характера (ламинарное пульсирующее течение) [184].

Толщина клеевого шва определяет необходимый технологический зазор между склеиваемыми деталями. Известно, что при рекомендуемых зазорах также образуется ламинарное движение, ввиду чего при таких значениях зазор характеризуется как щелевой [185, 186].

Основываясь на данных рассуждениях, расход клеевой композиции можно рассчитать следующим образом:

$$Q = \frac{\pi D \delta^2}{12 \mu L} (p_1 - p_2), \quad (57)$$

где D – внутренний диаметр кольцевого зазора, мм; δ – номинальный размер зазора, мм; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; L – длина образуемого зазора вдоль оси, мм; p_1, p_2 – давление на входе и выходе из зазора, Па.

Для упрощения операции нанесения клеевой композиции, улучшения заполнения шероховатой поверхности автором данной работы отдается предпочтение в нанесении клеевой композиции путем нанесения и обкатки прижимными роликами склеиваемых поверхностей. Необходимый зазор между роликом и обкатной поверхностью выбирается исходя из соображений оптимальной толщины клеевого шва и регулируется подачей, которую можно определить из следующего уравнения:

$$V_d = \frac{\pi d_d n_d}{1000}, \quad (58)$$

где d_d – диаметр обкатываемой поверхности, мм; n_d – частота вращения обкатываемой поверхности или обкатываемого ролика, об/мин.

Таким образом нет необходимости в откачке воздуха, как в случае нагнетания адгезива в щелевой зазор, выдавливание воздуха происходит самостоятельно. Схема обкатки прижимными роликами для внутренних и наружных поверхностей представлена на рисунке 61.

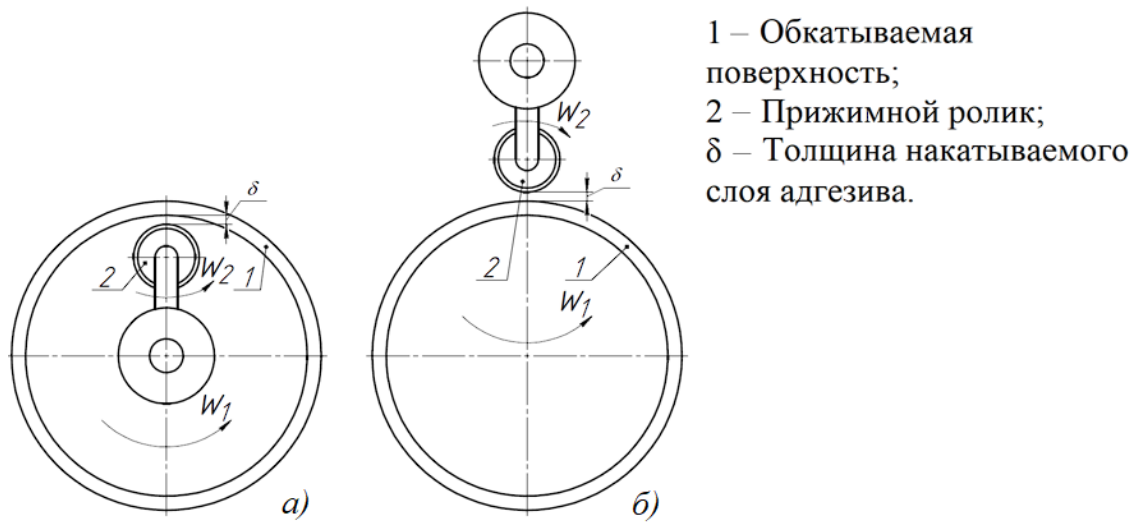


Рисунок 61 – Схема обкатки роликами:

a – внутренней поверхности; *б* – наружной поверхности

2.7 Выводы

1. Разработана технология модернизации утилизирующих реакторных агрегатов путем применения двухэлементного корпуса в виде комбинированного теплообменного элемента с термоконтактной поверхностью. Этапы технологии заключаются в формировании термоконтактной поверхности, придании листовому материалу формы корпуса технологического агрегата, образовании шероховатости и нанесении адгезива на внешней поверхности теплообменного элемента с последующей его фиксацией в реакторном агрегате.

2. Обосновано использование комбинированного теплообменного элемента с термоконтактными поверхностями в реакторах термической деструкции. Применение термоконтактной поверхности с выступами способствует увеличению

теплопередачи за счет увеличения площади поверхности теплообмена и переходу течения теплоносителя к более раннему турбулентному движению. Путем имитационного моделирования установлено влияние и шага полусферических выступов и иных форм термоконтактных элементов на теплообмен при различных скоростях теплоносителя. 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.

3. Проведено математическое описание взаимосвязей и оптимизация конструктивно-технологических и режимных параметров реакторного агрегата. В проведенных исследованиях установлено, 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.

4. Установлено, что в процессе формирования термоконтактных элементов возникающая деформация относительно направления длины листа является малой величиной, в результате чего данный процесс характеризуется как плоское деформированное состояние. Определено выражение для расчета величины прогиба части листа относительно прикладываемой силы при формировании термоконтактной поверхности.

5. Выявлено влияние величины шероховатости и толщины адгезива на качество клеевого соединения. При склеивании деталей рекомендуемые значения шероховатости находятся в диапазоне 2,5–5 мкм по Ra , при склеивании цилиндрических деталей $Ra = 1,6$ –3,2 мкм для большинства адгезивов. Толщина клеевой композиции из эпоксидной основы должна быть равной 0,05–0,25 мм, из акриловой основы – 0,03–0,5 мм. Представлена методика обработки поверхностей перед склеиванием. Предложена технология нанесения клеевой композиции с помощью обкатывания прижимными роликами.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДВУХЭЛЕМЕНТНОГО РЕАКТОРНОГО АГРЕГАТА ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ

3.1 Методика исследований формирования термоконтактной поверхности

Образование термоконтактной поверхности осуществляется путем механического воздействия на листовый материал формообразующим барабаном с профильным инструментом. Ранее было установлено, что в процессе формообразования возникает плоская деформация. С целью подтверждения данной гипотезы, а также влияния скорости процесса на качество получаемой поверхности был изготовлен инструмент для экспериментальных исследований, технологическая схема которого представлена на рисунке 62.

Инструмент для экспериментальных исследований (рисунок 62) состоит из несущего прутка 1 диаметром 10 мм, на котором расположены друг за другом радиально-упорные подшипники качения 2. Поверх подшипников качения располагаются несущие кольца 3, во впадинах которых равномерно по окружности закреплены формообразующие вставки 4 в виде шариков диаметром 10 мм. Для жесткой фиксации подшипников качения 2 используется стопорные кольца 5, закрепленные на трубе 1 посредством сварки, несущие кольца 3 при этом фиксируются на подшипнике качения 2 с помощью фиксаторов резьбы марки DoneDeal. Стопорные кольца 5 соединены с двух сторон с рамой 6, которая, в свою очередь, соединена с фиксирующей пластиной 7 для возможности установки инструмента в держатель.

Согласно рисунку 63, металлическая пластина 1, на которой происходит формирование термоконтактной поверхности, располагается на плите 2, в которой предварительно подготовлены технологические отверстия под образующиеся термоконтактные элементы диаметром, чуть большим (на толщину листа) чем диаметр формообразующего инструмента. Технологические отверстия

расположены с шагом, повторяющим шаг размещения формообразующих вставок в инструменте на рисунке 62. Пластина 1 и матрица 2 закреплены на опорном столе 3 с возможностью определения возникающих фактических усилий. Сам технологический инструмент посредством резцедержателя закреплялся на токарном станке. Размеры матрицы 2 и опорного стола 3 соответствуют геометрическим размерам листа 1. Опорный стол 3 выполнен боковыми упорами с целью избегания перекоса листа 1 и матрицы 2. Конструктивное исполнение инструмента для экспериментальных исследований представлено на рисунке 64.

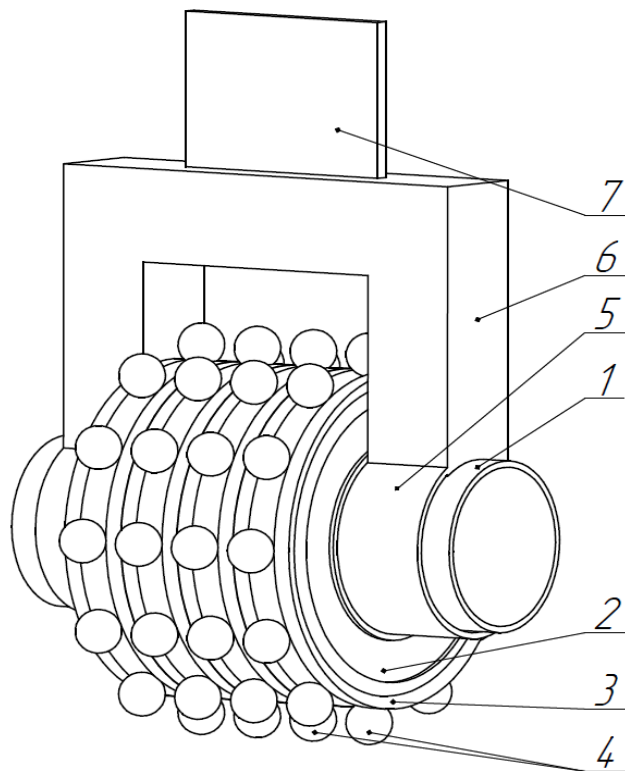


Рисунок 62 – Перспективное изображение инструмента для экспериментальных исследований формирования термоконтактной поверхности

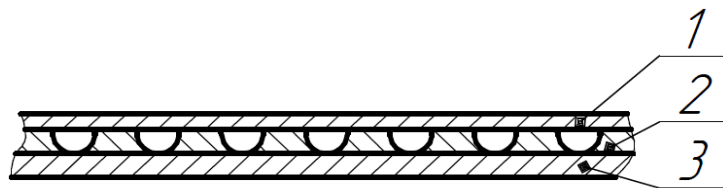


Рисунок 63 – Схема расположения металлического листа на соответствующей технологической оснастке

Для определения действительных значений силового воздействия, обеспечивающих наилучшее качество формообразования и возможные отклонения от математического выражения, оценка образования термоконтактного элемента производилась по единичному шаровому инструменту путем его внедрения в единичную впадину матрицы.

В качестве металлической пластины использовались образцы холоднокатаной отожжённой листовой стали (жесть ЭЖК) толщиной 0,36 мм, длиной 120 ± 1 мм и шириной 58 ± 1 мм. Степень твёрдости по Супер – Роквеллу с использованием алмазного столика равна 56 ± 3 (Т4), предел прочности $\sigma_B = 375 \pm 40$ МПа (ГОСТ Р 52204–2004). Модуль нормальной упругости E равен 203000 МПа, а коэффициент Пуассона $\nu = 0,29 \pm 0,4$ [187]. Температура окружающей среды – 25 ± 2 °С. Регулировка усилия производилась с помощью использования цифровых весов типа ГОСМЕТР ВПП-22.



Рисунок 64 – Конструктивное исполнение варианта инструмента для экспериментальных исследований

3.2 Анализ результатов исследований образования термоконтактной поверхности

Сравнение полученных экспериментальных данных осуществлялось с ранее полученным выражением для определения величины прогиба части металлического листа (выражение (40)). Расстояние от центра пластины b принималось равным 0 и $b = a/2$, $a = 15$ мм. Данные расчетных и экспериментальных значений прогиба при силовых воздействиях в 250, 500 и 750 Н представлены в таблице 8. Расчет погрешности осуществлялся по выражению $(\omega_{\text{фак}} - \omega_{\text{рас}} / \omega_{\text{рас}}) \cdot 100 \%$, где $\omega_{\text{фак}}$, $\omega_{\text{рас}}$ – фактические и расчетные значения прогиба.

Таблица 8 – Результаты экспериментальных исследований прогиба листового материала

Номер опыта	Значение прогиба ω (фактическое) при $b = 0$, мм	Значение прогиба ω (фактическое) при $b = a/2$, мм	Значение прогиба ω (расчетное), мм
1	1,08	0,61	1,01 (250 Н, $b = 0$) 0,57 (250 Н, $b = a/2$)
2	1,08	0,6	
3	1,08	0,6	
1	2,17	1,19	2,01 (500 Н, $b = 0$) 1,13 (500 Н, $b = a/2$)
2	2,16	1,2	
3	2,16	1,19	
1	3,25	1,8	3,02 (750 Н, $b = 0$) 1,7 (750 Н, $b = a/2$)
2	3,24	1,81	
3	3,25	1,8	

Экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными значениями. При $b = 0$ фактический прогиб пластины отличается от расчетного на 6,9–8 % в зависимости от необходимой высоты выступа. При $b = a/2$ различие фактических данных от расчетных находится в пределах 5,3–7 %. Погрешность полученных данных может зависеть от коэффициента Пуассона, от качества материала и погрешности измерительно инструмента.

Другим важным параметром при формообразовании является скорость подачи стола с металлическим листом. Качество образующихся термоконтактных элементов в зависимости от скорости подачи стола отражено в таблице 9.

Таблица 9 – Влияние скорости подачи стола на качество образуемой термоконтактной поверхности (выступы 1,7 мм)

Скорость подачи, мм/мин	Характеристика поверхности после формообразования	Вид поверхности после формообразования
1000	Образуемая термоконтактная поверхность характеризуется минимальным отклонением формы от формообразующего инструмента. Расположение канавок: симметричное	
2000	Формообразование на данных скоростях приводит к возникновению незначительного раскатывания на входе формообразующего инструмента. Расположение канавок остается симметричным	
3000	Повышение скорости способствует возникновению раскатывания поверхности как на входе, так и на выходе формообразующего инструмента. Наблюдается нарушение отклонения формы образуемой поверхности в результате смещения листа	
4000	Раскатывание на входе и на выходе приводит к более значительному отклонению образуемой поверхности от формообразующего инструмента. Происходит более частое смещение образуемых канавок относительно друг друга	

После формообразования проводились замеры изменения геометрических размеров листового материала. Таким образом, установлено, что во всех образцах не наблюдалось значительного изменения размеров. Так, после формообразования размеры образцов по длине составили 120,5, 120 и 119,5 мм, до формообразования ~120,5, ~120 и ~119,5. Различия заключаются в десятых и сотых знаках после запятой (рисунок 65). Средние размеры по ширине после формообразования составили 57,78, 58,39 и 58,05 мм, до формообразования – 58,32, 58,91 и 58,6 мм (рисунок 66). Практически неизменное значение размеров по длине и незначительное изменение размеров по ширине говорит о незначительно

возникающей деформации в продольном направлении листа, что позволяет сделать заключение о возникновении плоской деформации при формировании термоконтактной поверхности на листовом материале. Наибольшее увеличение размера листа наблюдается непосредственно в плоскости формообразующего инструмента. Данное значение составляет 1,7 мм. Образование термоконтактных выступов также может сопровождаться утонением металла.

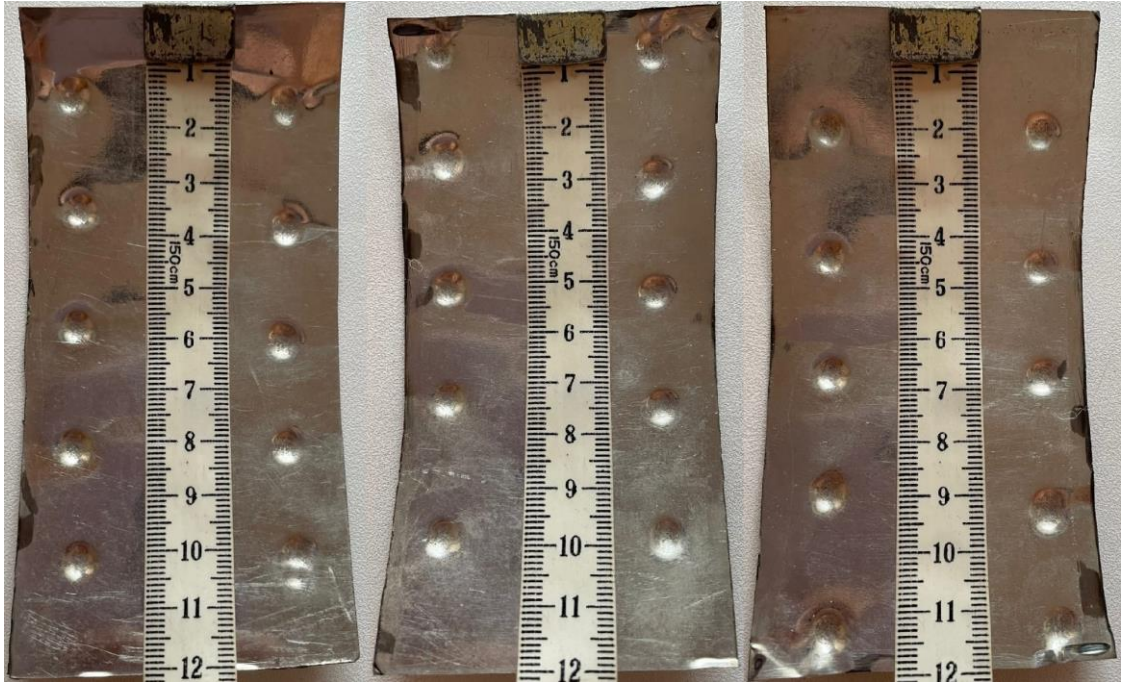


Рисунок 65 – Общий вид и размеры пластин по длине после формообразования



Рисунок 66 – Общий вид и размеры пластин по ширине после формообразования

3.3 Исследование технологических параметров сборки двухэлементного корпуса реакторного агрегата

Целью исследования технологических процессов сборки двухэлементного корпуса реакторного агрегата является определение сдвиговых усилий при повышенной температуре работы и сдвиговых усилий при различных значениях шероховатости и толщины клеевого шва, а также определение качества термостойких клеевых композиций, применяемых в машиностроении в качестве связующего элемента.

Исследование прочности адгезионного соединения проводились на технологической оснастке согласно ГОСТ 14759–69 «Метод определения прочности при сдвиге». В качестве образцов для испытаний использовались заранее подготовленные и обработанные пластины листового металла из стали 12Х18Н10Т размерами $l_1 \times H_1 \times B$ и $l_2 \times H_2 \times B$, соединенные между собой адгезивом различной толщины h . Геометрические размеры образцов и способ их соединения представлены на рисунке 67.

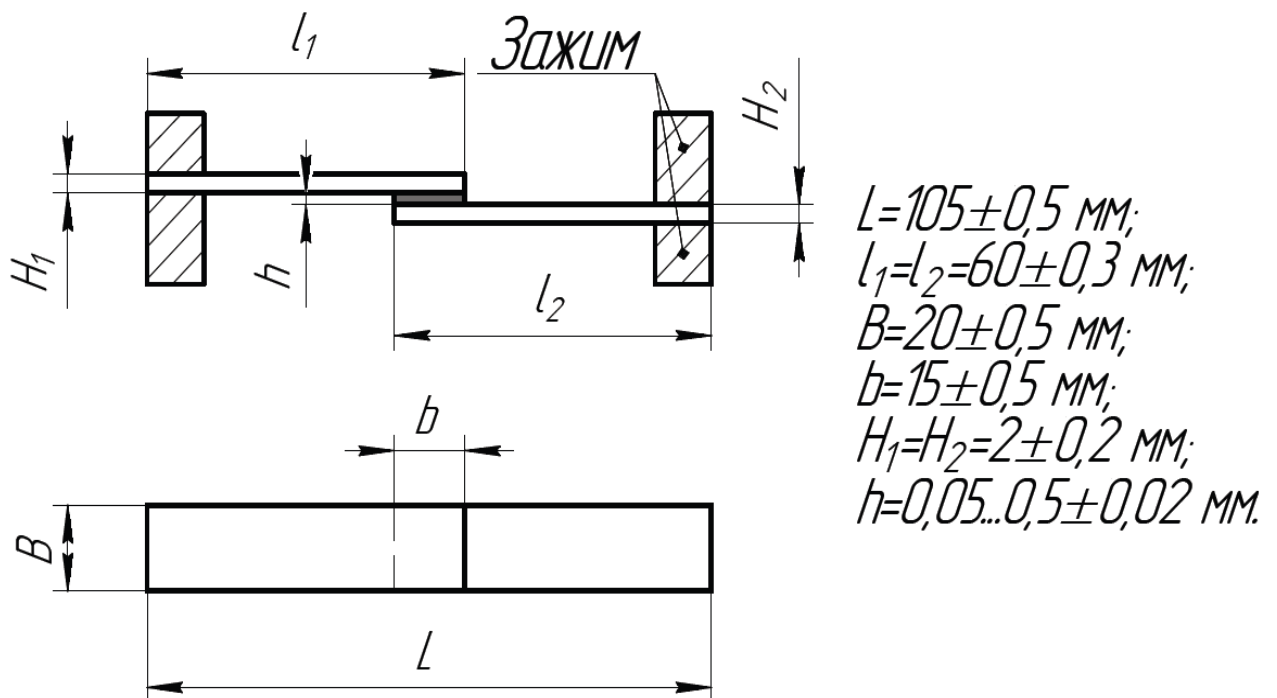


Рисунок 67 – Общий вид подготовленного для испытаний образца с указанием геометрических размеров

Обработка контактной поверхности слоя металлических пластин осуществлялась посредством шлифования. Величина шероховатости поверхности варьировалась от 1 до 6 мкм с шагом 1 мкм. Минимальная толщина клеевого соединения обеспечивалась путем прижима контактных поверхностей друг к другу с помощью рычажного пресса с дальнейшим ослаблением усилия. Толщина клеевого соединения в отдельных образцах для определения сдвиговых усилий изменялась в диапазоне от минимального до 0,5 мм с шагом 0,1 мм.

В качестве термостойкого адгезива в процессе эксперимента применялась наиболее перспективная клеевая композиция для пиролизных реакторов. Для этого использовался эпоксидный клей с модифицированной смолой СЭДМ-3-100 марки К-800 с отвердителем Л-20 (ОСТ В 6-06-5100-96) производства ООО «Полимерные композиции». Использование данного адгезива обосновывается его работой в широком диапазоне температур, устойчивостью к агрессивным средам и эластичностью за счет добавления присадок, обеспечивающих стабильную и продолжительную работоспособность при высоких температурах (300–600 °С). Технические характеристики данного адгезива представлены в таблице 10 [188]. В качестве дополнительной присадки к клеевой композиции использовался карбид бора (B_4C).

Таблица 10 – Характеристики термостойкого адгезива К-800

Характеристика	Значение
Рабочая температура, °С	от –196 до 800
Плотность, г/см ³	1,49
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) при температуре 20–430 °С	–
Прочность при сдвиге, МПа: – при температуре 25–400 °С; – при температуре 800 °С; – при температуре 1000 °С	16,2–0,28 0,34–0,22 –
Прочность на отрыв, МПа, соединений сталь + сталь при температуре 25±10 °С	16,5–19,5

После подготовки контактной поверхности производилось обезжиривание пластин следующим образом. Обработанные после шлифования пластины промывались проточной водой для удаления частиц металла с последующей сушкой при комнатной температуре (25 ± 2 °C) в течение 24 часов. В качестве обезжиривающего средства применялись пары тетрахлорэтилена с последующим их погружением в моющую ванну для механической чистки с использованием 8 % щелочным чистящим раствором типа «Деталан Ф» и дистиллированной воды. Затем обезжиренные пластины промывались с помощью водопроводной воды комнатной температуры в течении 10 минут с дальнейшей сушкой в тепловом шкафу Memmert UNB 200 (рисунок 68) при температуре 100 °C в течение 60 минут. На контактные части выборки подготовленных пластин наносился адгезив и осуществлялась их фиксация в неподвижном состоянии на протяжении 72 часов при комнатной температуре (25 ± 2 °C).



Рисунок 68 – Подготовленный к работе тепловой шкаф Memmert UNB 200

Прочность на сдвиг подготовленных образцов оценивалась на разрывной машине ИР6055-500.0 (рисунок 69). Температура испытаний составляла 25 ± 2 °C, для измерения температуры использовался термоэлектрический преобразователь

типа ТХА (К), а также измеритель-регулятор температуры двухканальный ОВЕН 2ТРМ1-Н.У.РР. Технологический процесс проведения испытаний в общем виде состоит из этапов, представленных на рисунке 70.



Рисунок 69 – Разрывная машина для испытаний ИР6055-500.0

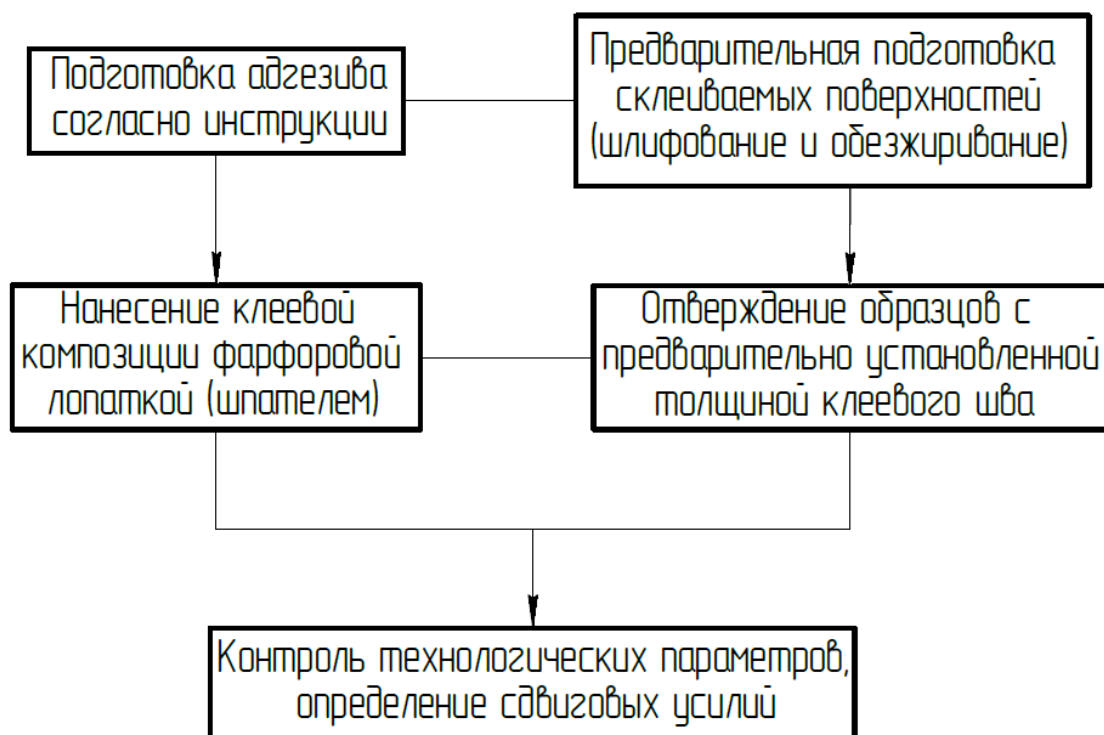


Рисунок 70 – Технологический процесс формирования образцов для испытаний

3.4 Экспериментальное определение оптимальных технологических параметров сборки двухэлементного корпуса реакторного агрегата

Экспериментальные исследования адгезионной прочности при сдвиговых усилиях показывают, что при повышении значений шероховатости с 1 до 3 мкм по Ra происходит плавное увеличение адгезионной прочности клеевого шва. Максимальное значения прочности достигается в диапазоне шероховатости от 3 до 3,2 мкм. Далее наблюдается постепенное снижение прочности, которая при значении в 6 мкм имеет значения, близкие к значениям, достигнутыми при 1 мкм. Изменение средней прочности на сдвиг клеевого шва от шероховатости представлено на рисунке 71.

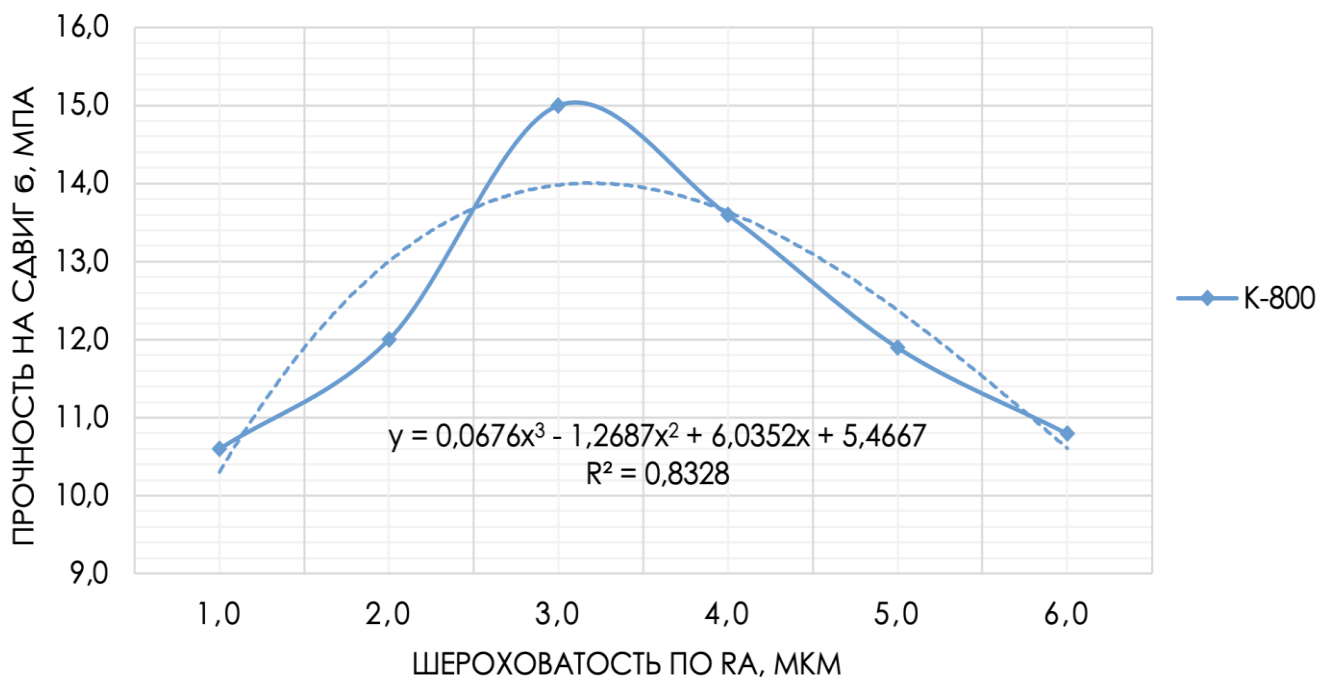


Рисунок 71 – Изменение средней прочности на сдвиг клеевого шва от шероховатости клеевой композиции K-800

При этом необходимо учитывать, что данные значения характеризуют поведение большинства адгезивов на эпоксидной основе при данных условиях, контактирующие поверхности которых перед склеиванием были предварительно обработаны с помощью шлифования.

Для поверхностей, обработанных иными методами, пик значения прочности на сдвиг может отличаться как в сторону меньшей, так и в сторону большей шероховатости [189].

Для определения сдвиговых усилий при повышенных температурах подготовленные образцы подвергались нагреву посредством технического фена. После достижения определенной температуры происходило ее измерение в нескольких точках контакта соединяемых деталей с целью определения среднего значения. Температура находилась в диапазоне от 200 до 600 °С с шагом 100 °С. Полученные в ходе эксперимента данные и их разброс от среднего значения представлены на рисунке 72.

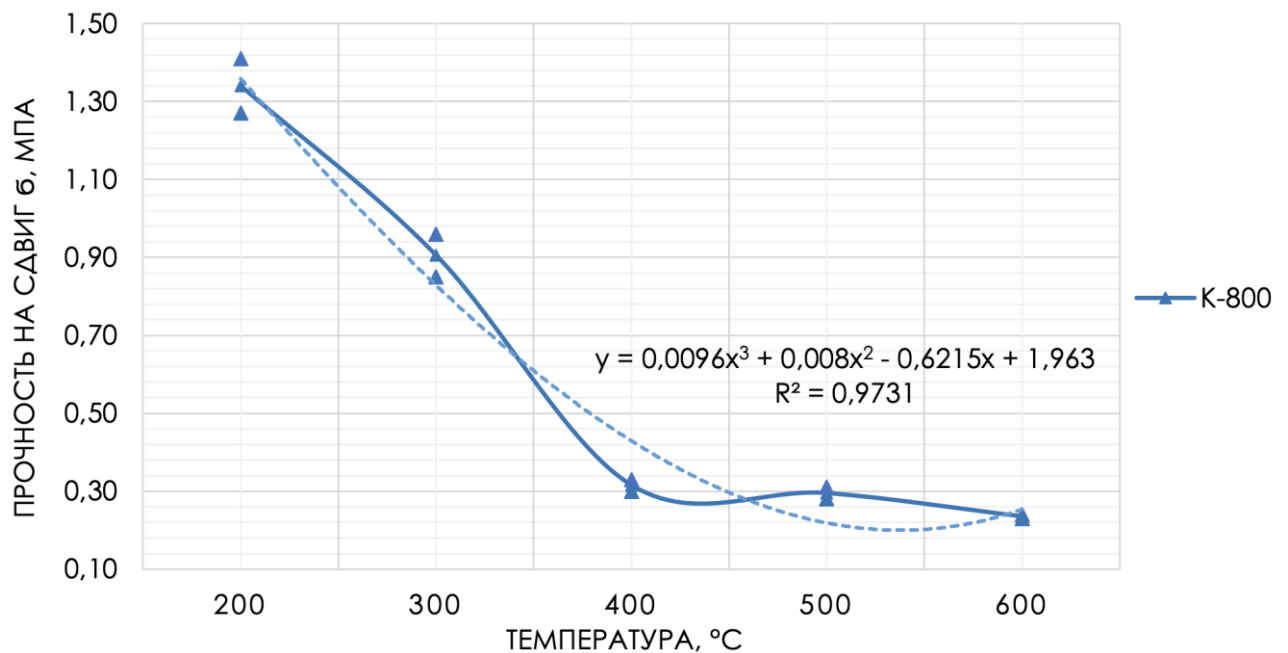


Рисунок 72 – Изменение средней прочности на сдвиг адгезионного соединения в зависимости от температуры адгезива K-800

Результаты показывают (рисунок 72), что с увеличением температуры происходит снижение прочностной характеристики клеевого состава. Снижение прочности на сдвиг происходит в результате термической деструкции эпоксидной основы с образованием твердых абразивных частиц входящих в состав компонентов, что приводит к снижению адгезионных взаимодействий. Особенно четко данное явление наблюдается в диапазоне температур 500–600 °С, где

показатель прочности приобретает наименьшее значение. Термостойкость и характеристики прочности при той или иной температуре обеспечиваются благодаря наличию в составе клеевой композиции тугоплавких карбидных соединений, а также активного наполнителя в виде карбида бора. Помимо этого, прочность адгезива во всем диапазоне температур реализуется за счет использования модифицированной эпоксидной смолы. Использование модифицированной смолы и дополнительных компонентов влияет также и на качество клеевого шва, увеличивая срок его службы. Отклонение от средней величины полученных значений не превышало 2–7 %. Данные отклонения сформированы исходя из многоповторности эксперимента.

Толщина клеевого шва, так же, как и температура, оказывает влияние на прочность и качество адгезионного соединения. Зависимость изменения сдвиговых усилий для клеев марки К-800 представлена на рисунке 73. Минимальное значение толщины клеевого шва принималось равным 0,05 мм, исходя из представленных ранее результатов экспериментальных исследований (рисунок 73). Образцы для исследования влияния толщины клеевого шва приведены на рисунке 74.

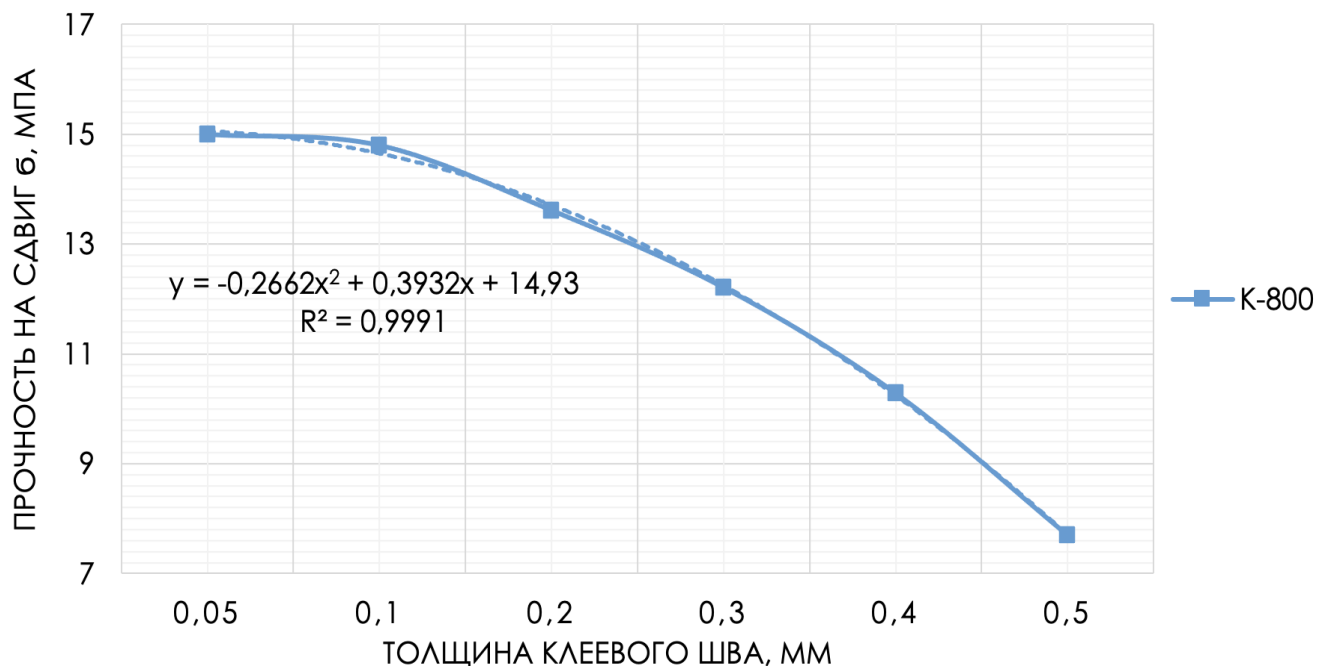


Рисунок 73 – Изменение средней прочности на сдвиг адгезионного соединения в зависимости от толщины клеевого шва адгезива К-800

Увеличение толщины клеевого шва, исходя из рисунка 73, приводит к монотонному уменьшению прочности клеевого соединения. Максимальное значение прочности достигается в рекомендуемых величинах толщины от 0,05 до 0,1 мм. Начальная точка на графике выбиралась исходя из измеренного зазора между склеенными пластинами после их фиксации в течение 72 часов. При увеличении толщины клеевого шва с 0,05 до 0,5 мм происходило уменьшение прочности клеевого шва практически в два раза. Снижению прочности способствуют образуемые напряжения отслаивания (концентрации напряжения), возникающие на краях соединения, на которых приходится наибольшая нагрузка, приводящие к образованию магистральной трещины и разрушению клеевого шва.



Рисунок 74 – Измерение толщины клеевого шва подготовленных для испытаний образцов

3.5 Экспериментальный стенд для исследования производительности работы реакторного агрегата с двухэлементным корпусом

3.5.1 Описание экспериментальной установки и методики экспериментальных исследований

Для проведения экспериментальных исследований по пиролизу органических продуктов с применением реакторного агрегата с двухэлементным корпусом была разработана экспериментальная установка, представленная на рисунке 75.

Цель исследования заключалась в установлении качественно-количественных характеристик образуемых газообразных и жидких продуктов пиролиза (состав парогазовой смеси, концентрация образовавшихся веществ) при термической деструкции нефтяных отходов месторождений Красноярского края. Производилось сравнение полученных характеристик газообразных продуктов в реакторе с гладким каналом и в реакторе, в котором термоконтактная поверхность канала модернизирована комбинированным теплообменным элементом.

Экспериментальная установка (рисунок 75) содержит реакторный агрегат пиролиза 1, конструкция которого представляет собой систему «труба в трубе» двухэлементный корпус 2 который выполнен в виде комбинированного теплообменного элемента. В случае реакторного агрегата с гладким каналом корпус 2 выполнен в одноэлементном исполнении. Для контроля за техническими показателями в реакторном агрегате 1 установлены термоэлектрические преобразователи 3 типа К, каждая пара которых подключена к измерителю-регулятору ОВЕН 2ТРМ1 4, а также манометр 5. Патрубок 6 предназначен для загрузки исходного сырья, патрубок 7 – для выгрузки продуктов реакции. Корпус 2 дополнительно сопряжен с патрубком 8 для ввода теплоносителя с одной стороны, соединенный с газонагревателем 9 и патрубком 10 для вывода теплоносителя, направленным в вытяжку 11 с другой стороны. При этом газонагреватель 9 соединен с техническим феном типа Forsthoff Grand-L-Electronic-

3000-50, который, в свою очередь, соединен с завихрителем газового потока [190] (на рисунке не показан), обеспечивает дополнительную турбулизацию потока теплоносителя. Патрубки 6 и 7 дополнительно содержат запорную арматуру, патрубок 7 соединен с тройником, одна часть которого предназначена для вывода избытка продуктов пиролиза через вытяжку 11 в атмосферу, другая часть соединена с входным патрубком 12 теплообменника 13. В теплообменнике 13 осуществляется охлаждение парогазовой смеси для комфортной температуры отбора проб через патрубок 14. Так, парогазовая смесь через патрубок 12 поступает в холодильник 13, через патрубок 15 осуществляется подача хладагента (проточной воды), вывод которого осуществляется через патрубок 16. Тройник, входной патрубков теплообменника 12 и выходной патрубков теплообменника также содержат запорную арматуру. Патрубки для ввода теплоносителя 8 и вывода теплоносителя 10 дополнительно снабжены расходомерами 17 типа Panametrics GM868(XGM) с опцией для высоких температур для контроля скорости теплоносителя.

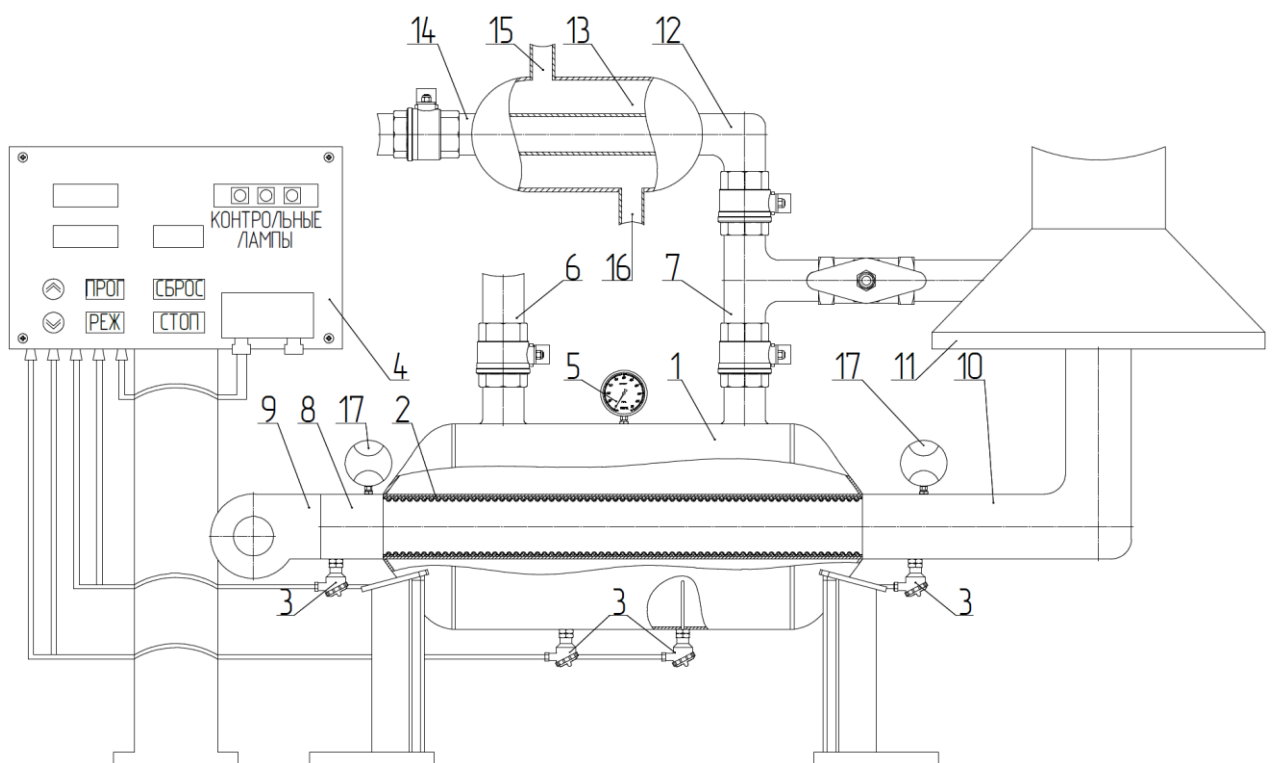


Рисунок 75 – Технологическая схема экспериментальной установки

Геометрические размеры реактора пиролиза были соблюдены в соответствии с размерами реактора для имитационного моделирования (рисунок 39). Конструктивное исполнение пиролизного агрегата представлено на рисунке 76. Принцип работы данного агрегата можно описать следующим образом. Исходные органические отходы после предварительной обработки поступают в реакционную камеру реакторного агрегата через патрубок 1. Далее осуществляется герметизация реакторного агрегата путем закрытия запорных устройств. Для начала процесса термической деструкции через канал, ограниченный входом 3 и выходом 4, подается теплоноситель в виде нагретого газа. После достижения заданной температуры и времени выдержки сырья осуществляется открытие запорных устройств и вывод продуктов реакции через патрубок 2. Контроль за давлением осуществляется через манометр, который присоединен к реакторному агрегату через трубку Перкинса 5. Дренажное отверстие 6 предназначено для очистки агрегата от продуктов термической деструкции.



Рисунок 76 – Конструктивное исполнение пиролизного агрегата:

1 – патрубок для ввода исходного сырья, 2 – патрубок для вывода продуктов пиролиза, 3 – ввод теплоносителя, 4 – вывод теплоносителя, 5 – трубка Перкинса, 6 – дренажный патрубок

Эквивалентный диаметр гладкого канала принимался равным диаметру гладкого канала $d_{\text{эк}} = d = 31$ мм. 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. Данные параметры термоконтактной поверхности были выбраны исходя из построенных профилей желательности (см. параграф 2.4). Графическое представление термоконтактной поверхности, которая используется в ходе экспериментальных исследований, представлено на рисунке 77. В качестве материала реакторного агрегата использовалась нержавеющая сталь марки 12X18H10T. Данная сталь также применялась для изготовления термоконтактной поверхности с полусферическими выступами. Для ее образования использовалось выражение (39). При сборке двухэлементного корпуса реакторного агрегата шероховатость поверхностей соединяемых элементов была равной 3,2 мкм по Ra (см. пункт 3.2.1).

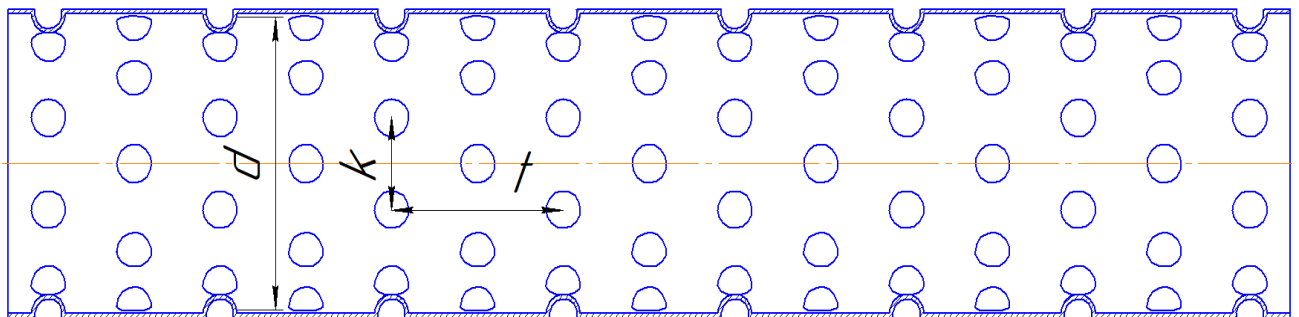


Рисунок 77 – Геометрические параметры термоконтактной поверхности с полусферическими выступами:

$$d_{\text{выс}} = 30,3 \text{ мм}; k = 10,8 \text{ мм}; t = 24,4 \text{ мм}; \text{высота выступов } 2 \text{ мм}$$

Для исследования химических характеристик продуктов пиролиза использовались образцы обводненной около 20 % масс (по ГОСТ 2477–2014) нефти с механическими примесями порядка 5 % масс (по ГОСТ 6370–83) нефтяных месторождений Красноярского края, сопоставимые по составу с нефтяными отходами. Свойства нефти данных месторождений представлены в таблицах 11 и 12.

Таблица 11 – Свойство товарной нефти месторождения Красноярского края А

Показатель	Значение
Плотность нефти, кг/м ³ при 20 °С	869,6...881,8
Динамическая вязкость, МПа·с при 20 °С	17,007...28,12
Массовое содержание, %	
– парафинов	2,38...3,37
– смол силикагелевых	6,28...6,62
– асфальтенов	0,102...0,108
– серы	0,142...0,152
Температура застывания нефти, °С	–12...–30
Молекулярная масса	242,4...275,2

Таблица 12 – Свойство товарной нефти месторождения Красноярского края Б

Показатель	Значение
Плотность нефти, кг/м ³ при 20 °С	802,4...822
Динамическая вязкость, МПа·с при 20 °С	5,3...16,44
Массовое содержание, %	
– парафинов	5,42...6,06
– смол силикагелевых	1,98...3,04
– асфальтенов	0,15
– серы	0,074...0,096
Температура застывания нефти, °С	~–15
Молекулярная масса	~200,7

Перед началом пиролиза реакторный агрегат продувался с помощью углекислого газа. Далее подготовленный образец путем забора с помощью мерного цилиндра помещался в реактор пиролиза через соответствующий патрубок. Отсчет времени пребывания сырья осуществлялся после выхода реактора на рабочую температуру (500 °С). При этом вначале реакционная камера реактора прогревалась до максимально возможной при заданных условиях температуры ~600 °С с дальнейшим ее снижением и поддержанием на уровне 500±20 °С. Забор пробы осуществлялся каждые 5 минут (от 5 до 40 минут). Давление внутри реактора поддерживалось в районе ~0,1 МПа. В качестве газа-теплоносителя использовался азот (N₂). Температура теплоносителя составляла порядка 800 °С.

Увеличение температуры теплоносителя с 700 до 800 °С сопряжено с погрешностью результатов (их завышение), полученных при имитационном моделировании. Скорость теплоносителя поддерживалась в пределах 3 м/с.

Для проведения анализа углеводородных веществ в продуктах пиролиза использовался хроматограф Clarus 600 и калориметр STA 449 Jupiter. Условия хроматографического анализа представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Условия хроматографического анализа

Параметр	Значение
Время анализа	180 мин
Объем пробы	1 мл
Длина колонки	100 м
Газ-носитель	Гелий
Температура:	
– колонки	250 °С
– детектора	300 °С

3.5.2 Результаты исследований и их обсуждение

Результаты образования газообразных продуктов пиролиза нефтяных отходов месторождения Красноярского края в зависимости от времени реакции представлены на рисунках 78–81. При анализе графиков видно, что в обоих случаях наблюдалось образование фракции легких углеводородов, состоящих из пяти веществ: метана (CH_4), этилена (C_2H_4), этана (C_2H_6), пропана (C_3H_8) и бутилена (C_4H_8). При переработке отходов месторождения Б наблюдается увеличение выхода суммарной концентрации газообразной смеси, что связано с показателями плотности нефти ($\rho_{\text{Б}} = \sim 812,2 \text{ кг/м}^3$ против $\rho_{\text{А}} = \sim 875,7 \text{ кг/м}^3$). Более высокие показатели плотности у нефти месторождения А также говорят о более высоких показателях смол и асфальтенов, что сказывается на выходе фракции легких углеводородов.

Время пребывания исходного сырья в реакторном агрегате определяет производительность пиролиза нефтяных отходов. Из графиков (рисунок 78–81)

следует, что на 30 минуте процесса суммарная концентрация получаемых веществ является максимальной. Дальнейшее увеличение времени не приводит к существенному изменению суммарной концентрации, а лишь происходит конверсия органических веществ. Поведение изменения концентрации веществ легкой фракции связано с природой образования и свойствами самой нефти.

При использовании модифицированного канала в виде комбинированного теплообменного элемента с полусферическими выступами высотой 2 мм наблюдается повышение суммарной концентрации газообразных продуктов пиролиза. Начиная с 20 минуты происходит резкое изменение концентраций образующихся продуктов реакции. Данные явления обусловлены более эффективным распределением тепловой энергии, передающейся от термоконтактной поверхности к нефтяным отходам. Более интенсивный нагрев нефтяных отходов также приводит к изменению количественного состава газообразных продуктов пиролиза (рисунок 80–81). Значительное изменение концентрации продуктов пиролиза, как и в случае с гладким каналом, наблюдается до ~30 минут.

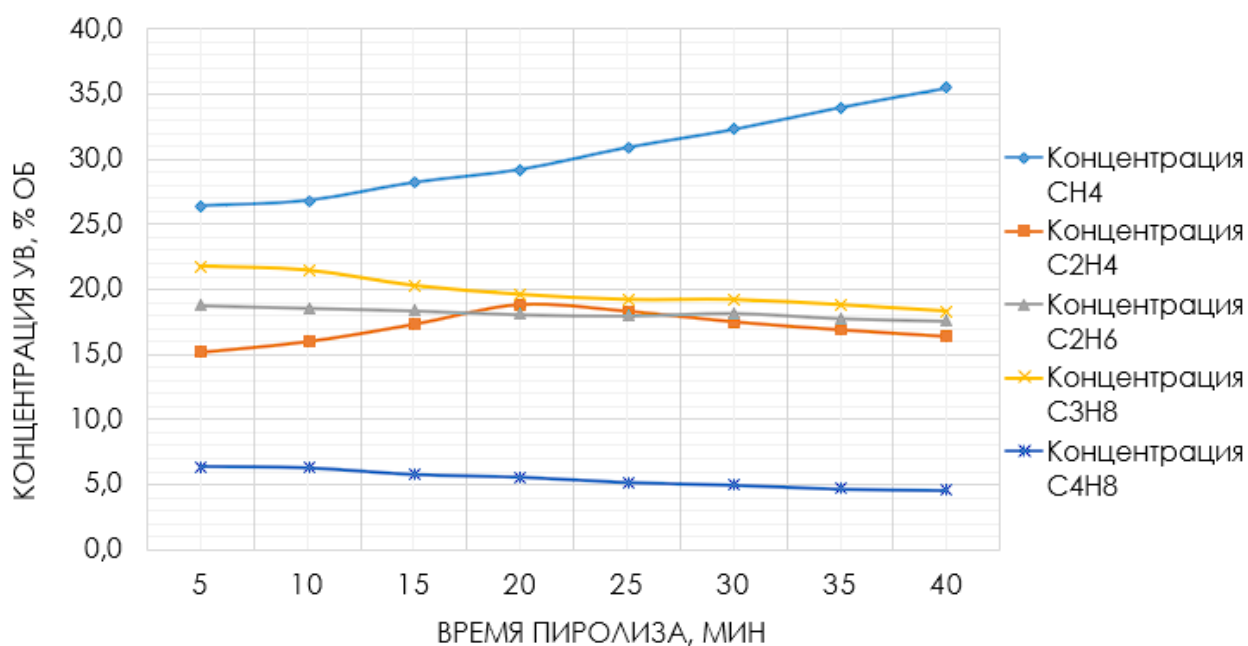


Рисунок 78 – Изменение концентрации газообразных продуктов пиролиза нефтяных отходов месторождения А в зависимости от времени реакции (гладкий канал)

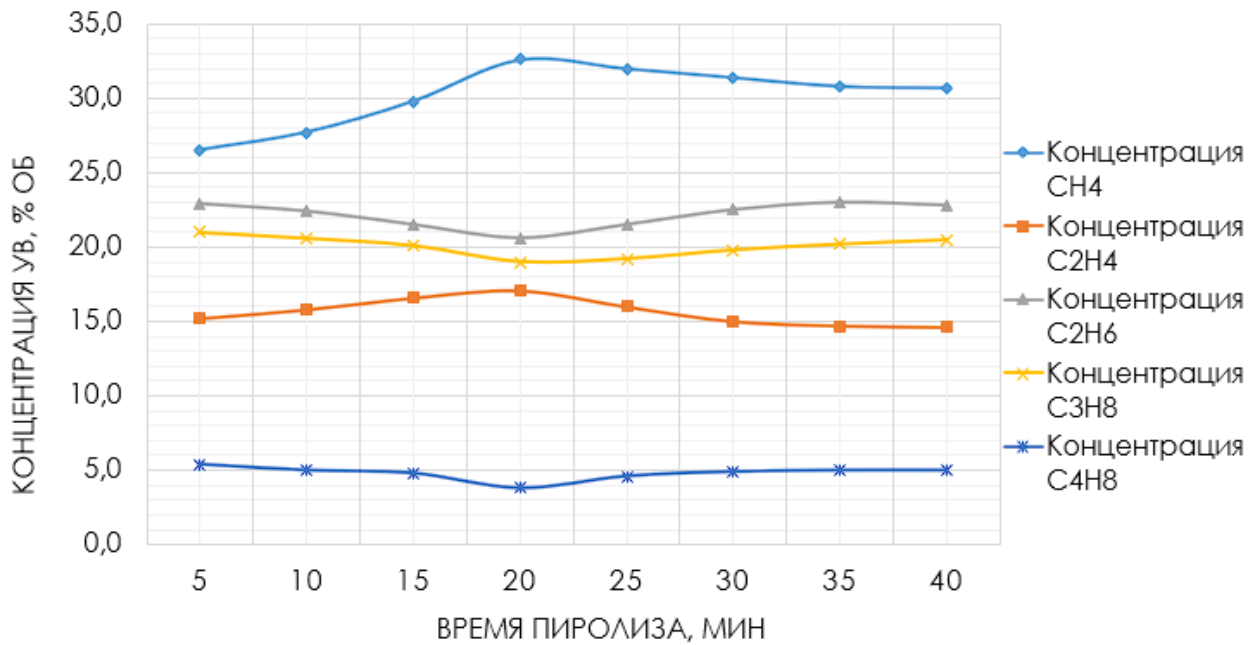


Рисунок 79 – Изменение концентрации газообразных продуктов пиролиза нефтяных отходов месторождения Б в зависимости от времени реакции (гладкий канал)

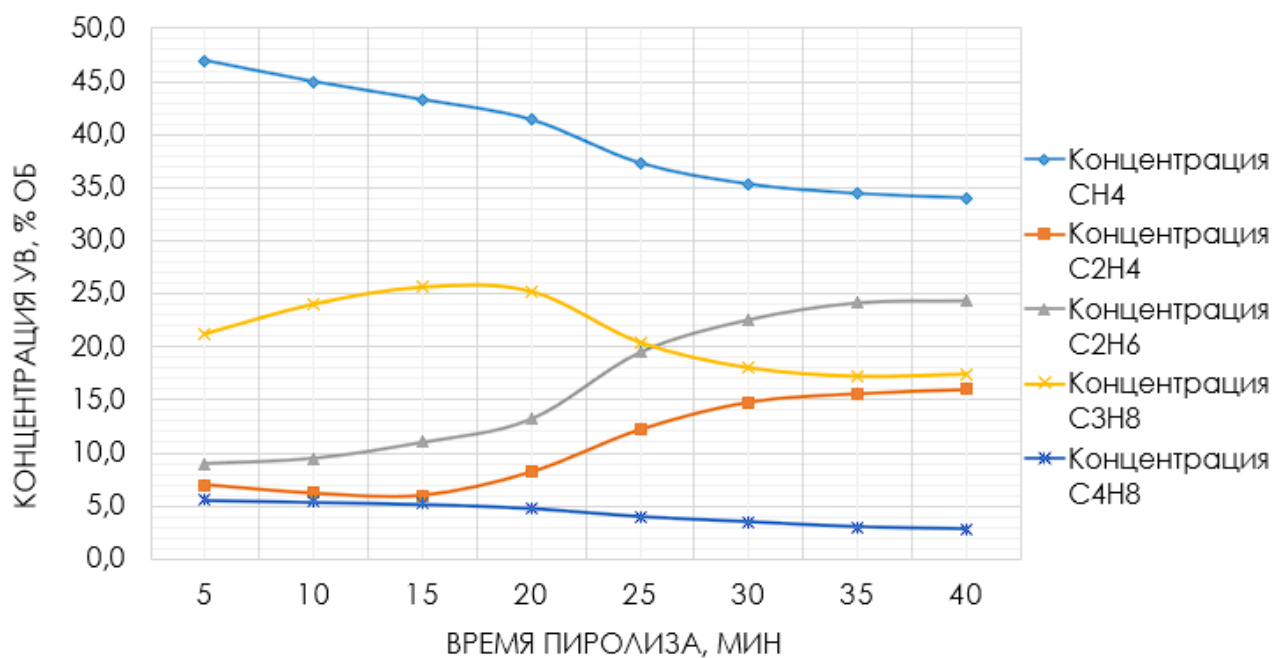


Рисунок 80 – Изменение концентрации газообразных продуктов пиролиза нефтяных отходов месторождения А в зависимости от времени реакции (модифицированный канал)

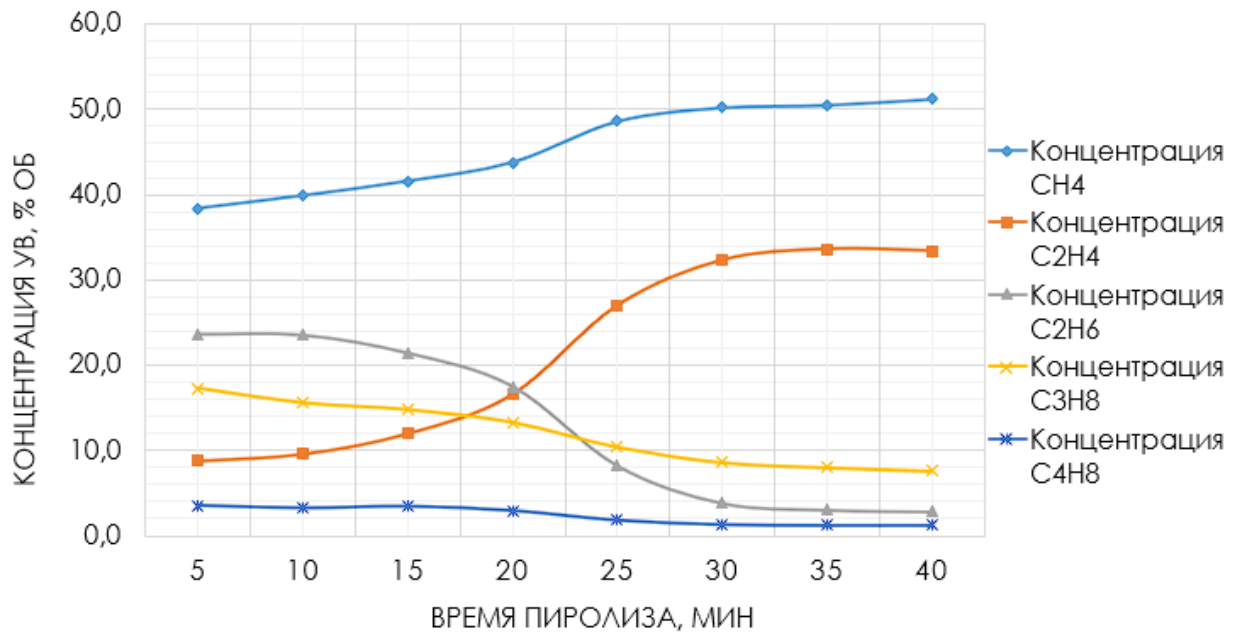


Рисунок 81 – Изменение концентрации газообразных продуктов пиролиза нефтяных отходов месторождения Б в зависимости от времени реакции (модифицированный канал)

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что при температуре процесса 500 ± 20 °C и давлении $\sim 0,1$ МПа без использования катализатора целесообразным является проведение реакции в промежутке от 25 до 40 минут (в зависимости от требуемого конечного продукта). Удельная теплота сгорания и состав газовой смеси близок к показателям попутного нефтяного газа. При этом средняя теплота сгорания смеси газообразных продуктов в заданном промежутке времени, получаемой из реактора с гладким каналом, составляет $61,55 \text{ МДж/м}^3$, из реактора с модифицированным каналом – $55,3 \text{ МДж/м}^3$. Дальнейшее увеличение времени реакции может приводить к возрастанию продуктов с более высокой теплотворной способностью, что может быть полезным при использовании газовой смеси в качестве топлива. Повышение температуры нагрева до 600 °C с дальнейшей ее стабилизацией на уровне 500 °C позволяет получить газообразные продукты с высокой теплотой сгорания. Данный эффект можно объяснить тем, что происходит минимизация выхода низкомолекулярных газообразных продуктов ввиду менее глубокого разрушения органической части отходов. В случае осуществления термической деструкции при постоянной температуре в 600 °C

максимальная теплота сгорания газообразных продуктов наблюдается на 5 минуте процесса. Далее происходит плавное снижение средней теплоты сгорания газовой смеси (от 50 МДж/м³ и ниже).

Анализ жидких продуктов пиролиза показывает, что они состоят из совокупности углеводородов алканового и алкенового рядов, а также циклических и ароматических углеводородов, наибольшие значения которых фиксируются в области C₁₀–C₁₇. Теплота сгорания совокупности жидких продуктов пиролиза позволяет применять их в качестве топлива после соответствующей обработки.

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 применении данной поверхности в новейших реакторных агрегатах пиролиза в совокупном использовании со специальными насадками [191] позволит значительно повысить эффективность процесса и снизить энергетические затраты.

Численные данные экспериментальных исследований, показанные на рисунках 78–81, представлены в виде средних значений величин. С целью определения погрешности и ошибки эксперимента каждая проба временной координаты исследовалась пять раз для дальнейшего анализа суммарной концентрации. Обработка результатов осуществлялась согласно ГОСТ Р 8.736–2011. На первом шаге определялось среднеарифметическое значение, а также число степеней свободы t -критерия Стьюдента [192]. Установим значение данных показателей на примере газовых проб, полученных при пиролизе нефтяных отходов месторождения А, при времени реакции 5 минут. Разность и разность квадратов будем определять относительно n_0 , которое примем равным 88,6 % (таблица 14).

Таблица 14 – Начальные данные для расчета ошибки и погрешности эксперимента

Номер пробы	n_{bi}	$n_{bi}-n_{b0}, \%$	$(n_{bi}-n_{b0})^2, \%$
1	88,80	0,2	0,04
2	88,72	0,12	0,0144
3	88,60	0	0
4	88,48	-0,12	0,0144
5	88,40	-0,2	0,04

Среднее значение $n_{вср}$ и среднеарифметическое отклонение $S_{вср}$ определим следующим образом:

$$n_{вср} = n_{b0} + \frac{\sum_{i=1}^n (n_{bi} - n_{b0})}{n} = 88,6 \%; \quad (59)$$

$$S_{вср}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (n_{bi} - n_{b0})^2 - n(n_{вср} - a_{b0})^2}{n(n-1)} = 0,0054 \%; \quad (60)$$

$$S_{вср} = \sqrt{S_{вср}^2} = 0,074 \%, \quad (61)$$

где n_{bi} – значение суммарной концентрации газообразных веществ n -ой пробы; n – количество отобранных проб.

Зададим число степеней свободы k из выражения $k = n - 1$. При значении степеней свободы $k = 4$ и уровня значимости $\alpha = 0,95$, определим по справочным данным t -критерий Стьюдента, который будет равен 2,776 ($p=2,776$). С учетом полученных данных произведём расчет абсолютной погрешности измерения:

$$\Delta x = p \cdot S_{вср} = 0,205 \%. \quad (62)$$

Результаты измерения данной величины можно представить в следующем виде: $(88,6 \pm 0,24) \%$.

Произведем расчет относительной погрешности измерения:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta x}{n_{\text{вср}}} = \frac{0,205}{88,6} \cdot 100 \% = \pm 0,231 \% \approx \pm 0,25 \%. \quad (63)$$

Рассчитывая таким образом ошибку для других выборок временных координат, получаем, что относительная ошибка суммарной концентрации газообразных веществ находится в диапазоне $\pm 0,22\text{--}0,24 \% \approx \pm 0,25 \%$.

Среднестатистические показатели выхода газообразных веществ с суммарной их концентрацией представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Средние показатели выхода легкой фракции при пиролизе органических отходов

Месторождение (тип канала реактора)	Время пребывания, мин	Суммарная концентрация легких УВ, об %	Относительная погрешность измерения, %
А (гладкий канал)	5	88,6	0,231
	10	89,2	0,236
	15	90,0	0,240
	20	91,3	0,223
	25	91,6	0,234
	30	92,2	0,242
	35	92,2	0,238
	40	92,4	0,236
Б (гладкий канал)	5	91,0	0,240
	10	91,5	0,241
	15	92,8	0,220
	20	93,1	0,221
	25	93,3	0,236
	30	93,6	0,226
	35	93,7	0,240
	40	93,6	0,232

Окончание таблицы 15

Месторождение (тип канала реактора)	Время пребывания, мин	Суммарная концентрация легких УВ, об %	Относительная погрешность измерения, %
А (канал с выступами)	5	89,8	0,233
	10	90,1	0,221
	15	91,1	0,228
	20	92,8	0,236
	25	93,4	0,234
	30	94,2	0,228
	35	94,4	0,230
	40	94,6	0,231
Б (канал с выступами)	5	91,6	0,238
	10	91,8	0,240
	15	93,2	0,241
	20	94,1	0,223
	25	96,0	0,239
	30	96,2	0,224
	35	96,3	0,237
	40	96,2	0,235

Помимо определения концентрации газообразных веществ, проводилось определение данных по интенсивности теплообмена (по критерию Нуссельта) в реакторном агрегате с гладким каналом и каналом с термоконтактной поверхностью в составе комбинированного теплообменного элемента, а также сравнение полученных экспериментальных данных с расчётными. Расчет погрешности осуществлялся по выражению $(Nu_{\text{экс}} - Nu_{\text{рас}} / Nu_{\text{рас}}) \cdot 100 \%$, где $Nu_{\text{рас}}$ – число Нуссельта, полученное при фиксированном значении вязкости теплоносителя, $Nu_{\text{экс}}$ – число Нуссельта, полученное при вычисленных значениях вязкости теплоносителя (на основе экспериментальных данных). Число Нуссельта при ламинарном и турбулентном течении теплоносителя определялось по выражениям (9), (10). Числа Рейнольдса и Грасгофа определялись исходя из следующих выражений:

$$Re = \frac{vD_r}{\nu}, \quad (64)$$

$$Gr = \frac{gL^3\beta(t_c - t_0)}{\nu^2}, \quad (65)$$

где ν – характерная скорость течения теплоносителя, м/с; D_r – гидравлический диаметр, который эквивалентен диаметру канала, м; ν – кинематическая вязкость газа-теплоносителя, м²/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; L – определяющий характерный линейный размер канала с теплоносителем, м; β – температурный коэффициент объемного расширения теплоносителя, который для газов рассчитывается следующим образом: $\beta = 1/(273 + t_0) \cdot K^{-1}$; t_c – температура поверхности теплообмена, °C; t_0 – температура теплоносителя, °C.

В качестве газа-теплоносителя использовался диоксид углерода (CO₂). Использование диоксида углерода обусловлено меньшим значением кинематической вязкости ($\nu = 77,1 \cdot 10^{-6}$ м²/с для CO₂ и $\nu = 116,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с для N₂ при 700 °C), в результате чего удастся добиться турбулентности потока ($Re > 2300$) при более малых скоростях течения газа-теплоносителя. При использовании N₂ скорость течения теплоносителя при переходе к турбулентному режиму течения должна быть выше, чем при использовании CO₂, что делает лабораторный эксперимент затруднительным. Тем не менее полученные зависимости изменения интенсивности теплообмена будут иметь аналогичный характер при использовании другого газа-теплоносителя. Различие будет состоять лишь в скорости, при которой достигается турбулентный режим течения.

Скорость течения теплоносителя варьировалась от 1 до 7 м/с. Гидравлический диаметр гладкого канала и канала с выступами принимался равным их эквивалентным диаметрам (31 и 30,3 мм). Длина канала равнялась $L = 150$ мм. Для экспериментальных исследований кинематическая вязкость теплоносителя определялась исходя из его средней температуры в канале, посчитанной в нескольких точках. Результаты исследований представлены на рисунке 82.

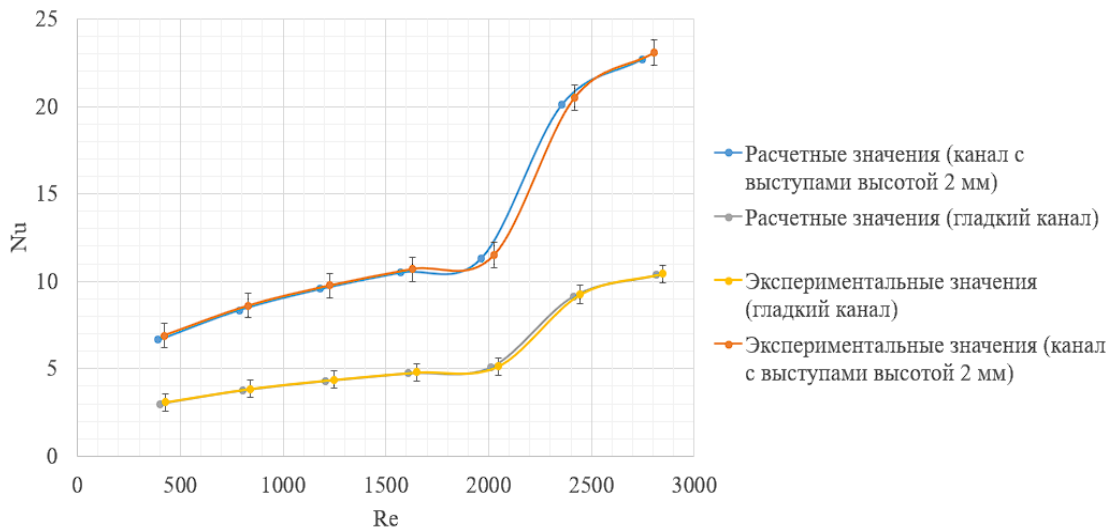


Рисунок 82 – Изменение интенсивности теплообмена (по критерию Нуссельта) в зависимости от скорости течения теплоносителя (по критерию Рейнольдса)

При сравнении чисел Нуссельта, полученных при течении теплоносителя в реакторном агрегате с гладким каналом и каналом, модифицированным комбинированным теплообменным элементом с полусферическими выступами высотой 2 мм, становится очевидным эффективность последнего. Как показано на рисунке 82, термоконтактная поверхность с выступами значительно улучшает характеристики теплопередачи. По сравнению с гладким каналом канал с выступами в среднем увеличивает теплоотдачу до 2,23 раз. При этом данное отношение интенсивностей теплообмена несколько снижается с увеличением числа Рейнольдса, что, вероятно, связано с увеличением мертвой зоны за выступом и, следовательно, уменьшением рабочей поверхности канала.

Следует понимать, что полученные зависимости для канала с выступами являются ориентировочными при оценке эффективности теплоотдачи. Для более точной оценки необходимо провести комплексные исследования, так как может оказаться, что поправочный коэффициент, входящий в уравнения для определения чисел Нуссельта (9) и (10) для данных условий будет иметь большую погрешность и потребуются его корректировка. Погрешность экспериментальных данных с аналитическим расчетом составила от 0,77 до 3,01 % для гладкого канала. Для канала с полусферическими выступами высотой 2 мм погрешность составила от 1,54 до 3,61 %.

3.6 Выводы

1. В результате проведенных исследований установлено, что процесс формообразования можно рассматривать как плоскую задачу. При этом контроль усилия формообразования возможно осуществлять по уравнению несимметричного прогиба части листа. Результаты экспериментальных исследований показывают хорошую совместимость с аналитическим решением. Отклонение экспериментальных данных от расчетных составляет 5,3–8 %. Качество образующейся термоконтактной поверхности зависит также от скорости формообразования.

2. При использовании клеевой композиции на эпоксидной основе высокое качество адгезионного соединения обеспечивается при получении шероховатости шлифованием, равным $\sim 3,2$ мкм по *Ra*. Отклонение шероховатости до 1 и 6 мкм способствует плавному снижению прочности, порядка 30 %. Повышение температуры приводит к снижению прочности соединения. Наиболее резкое снижение наблюдается с 25 до 400 °С. При максимальной температуре в 600 °С прочность клеевого соединения составила 0,24 МПа. Отклонение данных от средней величины составило 2–7 %. Наиболее высокая прочность соединения обеспечивается при толщине клеевого шва в 0,05 мм, увеличение толщины шва до 0,5 мм приводит к двукратному уменьшению прочности.

3. На основе экспериментальных данных установлено, что реакторный агрегат с двухэлементным корпусом, термоконтактная поверхность которого образована полусферическими выступами, является более производительным. Об этом свидетельствует увеличение суммарной концентрации легких углеводородов. Модификация конструкции реакторного агрегата позволила повысить выход легких углеводородов при утилизации органических отходов нефтяных месторождений Красноярского края. При утилизации отходов месторождения А суммарная концентрация возросла с 88,6–92,4 до 89,8–94,6 %, месторождения Б – с 91,0–93,6 до 91,6–96,2 % соответственно.

4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОМЫШЛЕННОМУ ИЗГОТОВЛЕНИЮ И ПРИМЕНЕНИЮ ДВУХЭЛЕМЕНТНОГО КОРПУСА В ВИДЕ КОМБИНИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕННОГО ЭЛЕМЕНТА

4.1 Технологические рекомендации по образованию термоконтактной поверхности

Как было описано ранее во 2 главе, после осуществления листогибочной операции необходимо провести фиксацию контура металлического листа с термоконтактной поверхностью. С целью упрощения подготовительных операций перед сборкой двухэлементного корпуса реакторного агрегата для металлических листов малой толщины после листогибочной операции возможно произвести вальцевание (вместо операций склеивания или сварочных операций) контура листа с образованием фиксирующего замка.

Данную технологическую операцию вальцевания можно описать следующим образом (рисунок 83). Металлический лист с термоконтактной поверхностью 1 диаметром d помещают в специальный цилиндрический барабан 2 диаметром D , при этом диаметр барабана больше диаметра металлического листа в форме цилиндра на толщину данного листа. Вместе с этим металлический лист 1 должен иметь определенный припуск, чтобы после замыкания контура теплообменной поверхности металлический лист уменьшился на величину припуска и приобрел номинальный диаметр d . Для формирования замка 3 в цилиндрическом барабане 2 выполнена прорезь, в которую протягиваются противоположные концы листа, образуя при этом соединение, как показано на рисунке 83. После формирования соединения цилиндрический барабан 2 с металлическим листом 1 помещают на опорную балку 4, которая повторяет форму металлического листа и имеет в своем составе упругий элемент для исключения деформации элементов термоконтактной поверхности. Далее путем движения закаточного ролика 5 происходит образование двойного закаточного шва. Рабочая поверхность закаточного ролика 5 имеет радиус кривизны, равный радиусу кривизны металлического листа после

$$p = (1, 8 - 2, 1)\sigma_T, \quad (66)$$

4.2 Технологические рекомендации по сборке комбинированного теплообменного элемента

Для расширения арсенала используемого инструмента, с помощью которого происходит образование шероховатой поверхности при склеивании, необходимо учитывать влияние того или иного способа образования шероховатости на прочностные характеристики клеевого соединения. В главе 3 диссертационного

исследования было определено влияние шероховатости на прочность клеевого соединения, полученной путем обработки шлифованием как наиболее распространенного способа обработки металла на производстве. Однако обрабатывать поверхность можно более грубым способом – пескоструйной обработкой и менее грубым – фрезерованием. Изменение прочности клеевого соединения от вида обработки в общем виде можно представить в форме графиков, представленных на рисунке 84. В качестве склеивающего компонента авторами работы применялся тиксотропный металлонаполненный композитный материал на основе эпоксидных смол и волоконных наполнителей «Металл-Супер». Соединяемыми деталями являлись стальные пластины [194].

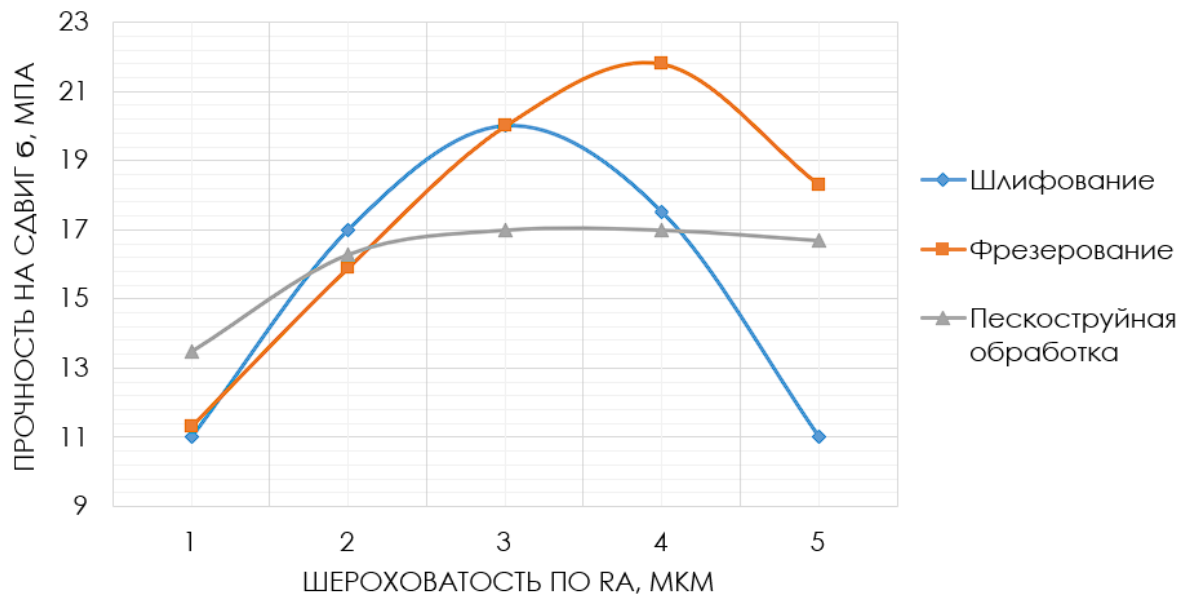


Рисунок 84 – Изменение прочности адгезионного соединения от вида обработки соединяемых поверхностей

Из представленных зависимостей следует (рисунок 84), что наименьший показатель прочности адгезионного соединения достигается при пескоструйной обработке, наивысший – при фрезеровании. Различие наблюдается в величине шероховатости, при которой получается наивысший показатель прочности соединения. Так, наилучшими показателями шероховатости при обработке пескоструйной обработкой и шлифованием являются величины $\sim 3,5$ и 3 мкм по Ra , в случае фрезерования пик прочности достигается при значении ~ 4 мкм по Ra .

Другим важным фактором, определяющим значение прочности клеевого соединения, является величина нагрузки при склеивании. Увеличение нагрузки при склеивании приводит к смещению значения максимальной прочности в сторону большей шероховатости [195]. Изменении величины нагрузки с $0,107 \text{ кгс/см}^2$ до $0,226 \text{ кгс/см}^2$ при шлифовании приводит к увеличению максимальной прочности на сдвиг и пиковой его прочности со значения $\sim 2,9 \text{ мкм}$ по Ra и $\sim 22,3 \text{ МПа}$ до $\sim 4 \text{ мкм}$ по Ra и $\sim 21,35 \text{ МПа}$. При фрезеровании также наблюдается смещение пиковой прочности со значения шероховатости $\sim 3,05 \text{ мкм}$ по Ra до $\sim 4,4$ по Ra . Максимальная прочность при этом увеличивается незначительно (рисунок 85). Дальнейшее увеличение нагрузки при склеивании, согласно работе [195], также приводило к смещению пиковой прочности в сторону большей шероховатости. Зависимости, представленные на рисунке 85, были получены при использовании эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердителя Л-20. Склеиваемый материал – стальные пластины.

Изменение значений прочности адгезионного соединения при различных видах обработки и нагрузке при склеивании можно объяснить более лучшим заполнением углублений на поверхности деталей.

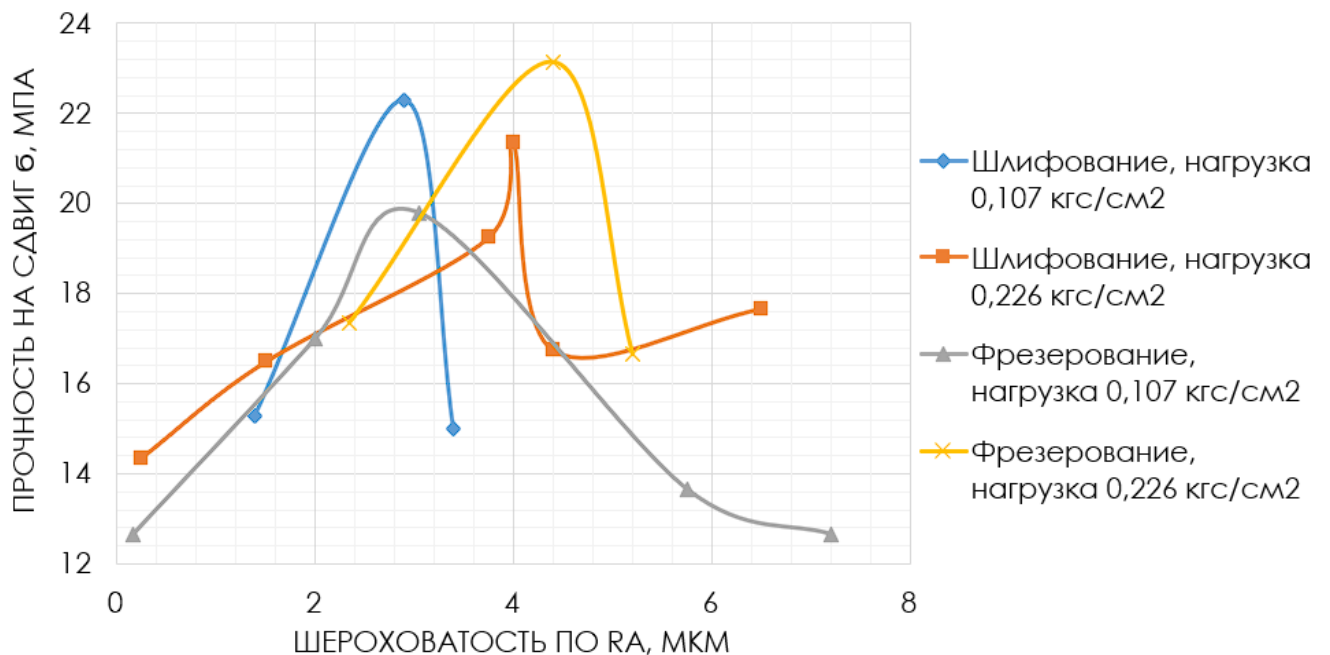


Рисунок 85 – Изменение прочности адгезионного соединения в зависимости от нагрузки при склеивании

Еще одним важным критерием в рамках промышленного производства является время, которое будет затрачено на изготовление двухэлементного корпуса реакторного агрегата. Данный показатель определяет показатель эффективности деятельности предприятия. Для снижения времени изготовления двухэлементного корпуса возможно осуществлять ускоренную сушку клеевого шва посредством воздействия повышенными температурами. Однако применение клеевых композиций холодного отверждения является исключением, повышение температуры данных композиций может привести к деструкции клеевого состава.

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 86) [196]. Из рисунка 85 отчетливо видно, что с увеличением температуры снижается время отверждения клеевых композиций, которое может изменяться в зависимости как от состава самого клея, так и от вида отвердителя.

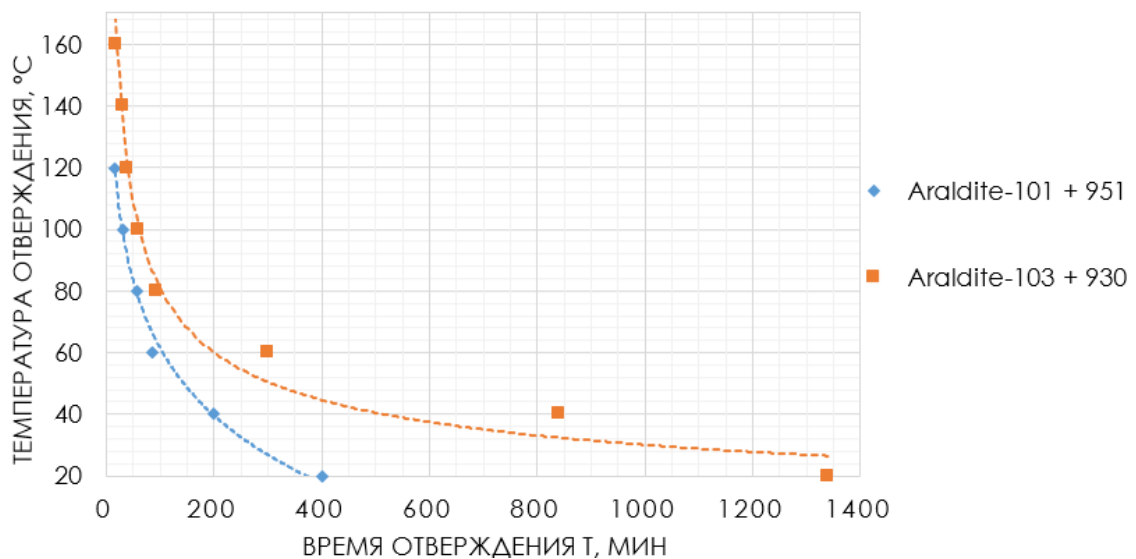


Рисунок 86 – Изменение времени отверждения эпоксидных смол Araldite в зависимости от температуры

Однако необходимо учитывать, что увеличение температуры приводит к изменению динамической вязкости адгезива при его отверждении, в результате увеличения которой изменяется степень смачивания неровностей соединяемых

деталей. Поэтому необходимо дать клею заполнить все неровности, прежде чем приступать к увеличению температуры сушки. К тому же чрезмерная температура сушки может привести к деструкции отвержденного связующего, разрушая клеевое соединение. Определить время равновесного смачивания [197] можно с помощью следующего выражения:

$$t = \frac{3\eta h^2}{D\gamma_{\kappa} \cos \theta}, \quad (67)$$

где h – глубина затекания клея в пору со средним диаметром D за время t , м; γ_{κ} – поверхностное натяжение клея, Н/м; θ – краевой угол смачивания; η – вязкость клея, мПа·с.

Расчет прочности соединения термоконтактная поверхность – корпус реактора, а также различных термоконтактных поверхностей с корпусом оборудования цилиндрической формы можно определить через разрушающее напряжение [198]:

$$\tau = K\tau_{\text{ак}}, \quad (68)$$

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 клеевого 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 клеевого шва при аксиальном сдвиге, МПа.

4.3 Применение комбинированного теплообменного элемента в составе технологического оборудования реакторной линии

Двухэлементное исполнение корпуса в виде комбинированного теплообменного элемента для повышения эффективности протекающих процессов целесообразно использовать в новейших реакторных агрегатах термической деструкции. В качестве эффективной конструкции реактора с точки зрения тепломассообменных процессов можно использовать реактор секционного типа [12], разработанный и исследованный автором данной работы. В результате исследований показано, что в конструкции секционного типа лучше осуществляется тепломассоперенос и повышается конверсия и селективность процесса [115, 191, 199].

Многосекционный реактор пиролиза (рисунок 87–89) представляет собой конструкцию, содержащую корпус 1, выполненный в виде правильного цилиндра, нагреватели 2, трубы для подачи исходного сырья 3, трубы для отвода продуктов пиролиза 4 и трубы для подачи окислителя и очистки реактора от зольного остатка 5. При этом корпус 1 выполнен из жаропрочного материала с обработанными внутренними стенками с теплоотражающим 6 и теплопринимающим 7 покрытиями (рисунок 89). Внутри корпуса реактора 1 расположено четыре рабочих секции 8–11, разделенные между собой перегородками 12, каждая из которых может работать в двух режимах (пиролиз, окисление), дозирующее устройство 13 для обеспечения распределения отходов между секциями и насадка (теплостабилизатор) 14, обеспечивающая равномерный нагрев исходного сырья.

Режим работы реактора постоянный, с периодическим изменением рабочих секций «крест-накрест» (рисунок 89). В качестве теплоотражающего покрытия применяются классические теплоизоляционные материалы (керамические листы, стеклоткань и др.), в качестве теплопринимающего покрытия – термоконтактные поверхности. Насадка имеет антипригарное покрытие, исключающее возможность ее закоксовывания.

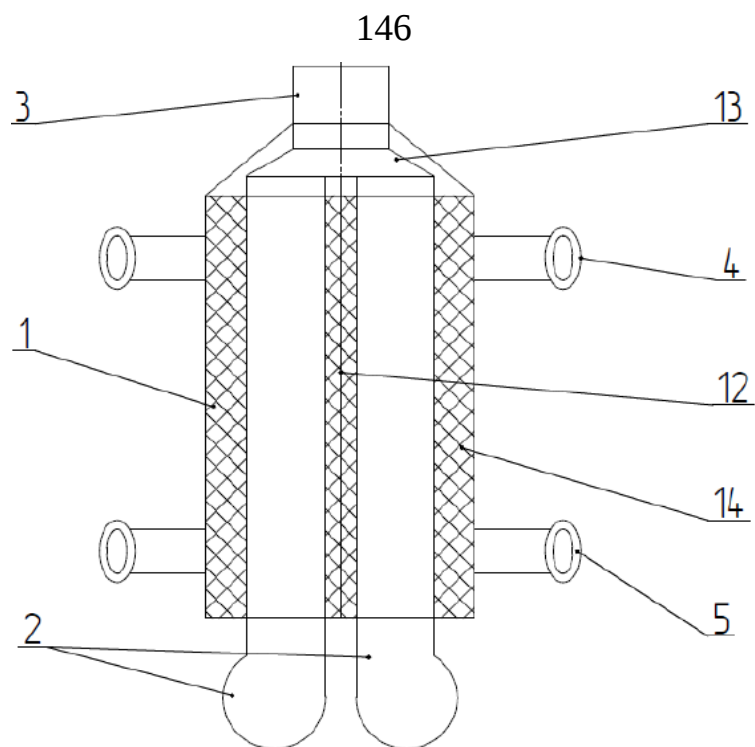


Рисунок 87 – Многосекционный реактор пиролиза, общий вид

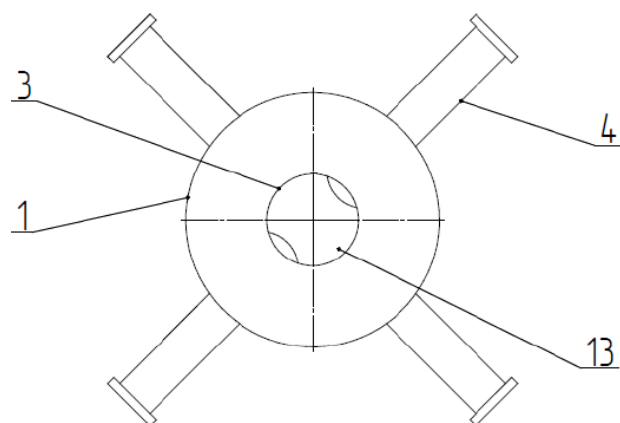


Рисунок 88 – Многосекционный реактор пиролиза, вид сверху

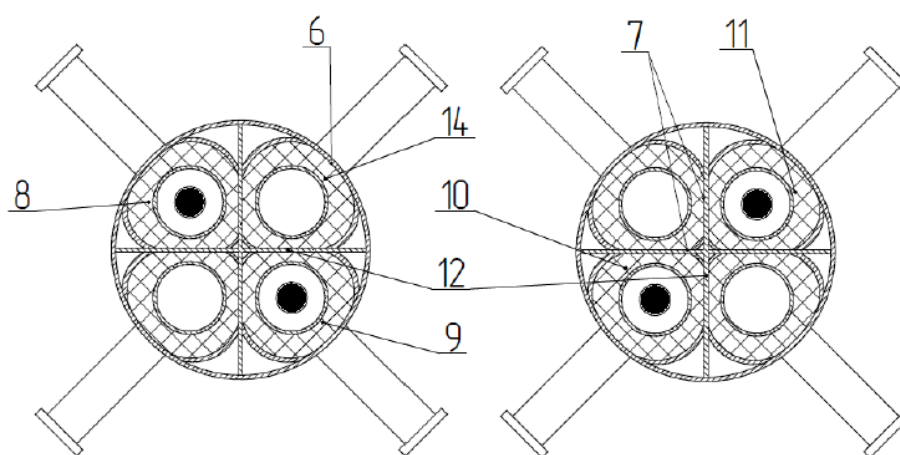


Рисунок 89 – Поперечный разрез реактора с режимами работы секций

Упомянутый в главе 3 завихритель газового потока [190] обеспечивает эффективный теплообмен за счет управляемого завихрения циркулирующего теплоносителя. В результате этого происходит турбулизация потока на низких показателях числа Рейнольдса, что способствует более лучшему теплообмену. Завихритель газового потока (рисунок 90) содержит цилиндрический корпус 1, выполненный со ступенчатым центральным каналом, цилиндрическую вставку 2, сопрягаемую с корпусом посредством резьбового соединения, входной цилиндрический канал 3, резонирующую камеру 4, сообщающуюся с выполненным по оси корпуса конфузорным каналом 5. Полая цилиндрическая вставка 2 установлена в корпусе 1 с возможностью ее регулирования для изменения объема резонирующей камеры 4, торец которой фиксируется с помощью контргайки 6. В торце выходного участка корпуса на резьбовом соединении установлена насадка 7, снабженная выходным отверстием 8, имеющим конфигуральную поверхность для обеспечения функциональной настройки завихрителя (вставки различной формы).

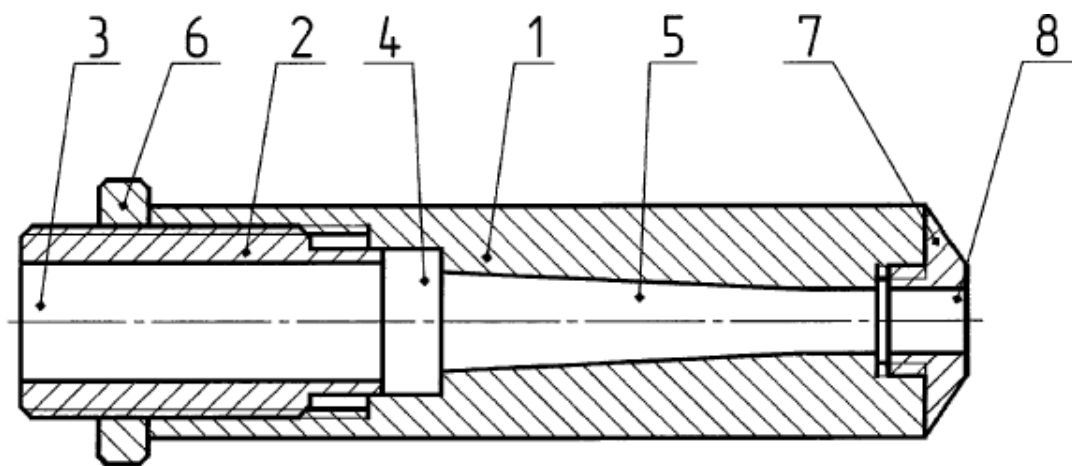


Рисунок 90 – Завихритель газового потока, общий вид

Завихритель представляет собой дополнительное устройство, интенсифицирующее теплообмен, что способствует повышению эффективности протекающих процессов, являясь неотъемлемой частью технологической установки. Конструктивные особенности завихрителя позволяют осуществлять течение теплоносителя по всему объему канала.

Используемая установка для экспериментальных исследований была выполнена в форме уменьшенной версии разработанной промышленной реакторной линии [11], технологическая схема которой представлена на рисунке 91. Технологическая линия для переработки органических отходов различного происхождения содержит многосекционный реактор пиролиза 1, имеющий теплоизоляцию. Внутри корпуса реактора расположены нагреватели. Пиролизная установка также содержит насос 2 для подачи органических отходов, теплообменник 3, отстойник 4, насос 6 для вывода жидких продуктов, вентилятор высокого давления 8 для вывода газообразных продуктов, циклон 5 и гидроциклон 10, служащие для очистки конечных продуктов, а также газгольдеры 10, ресивер 7 и реактор для получения водорода и углеродных наноматериалов 11 [200].

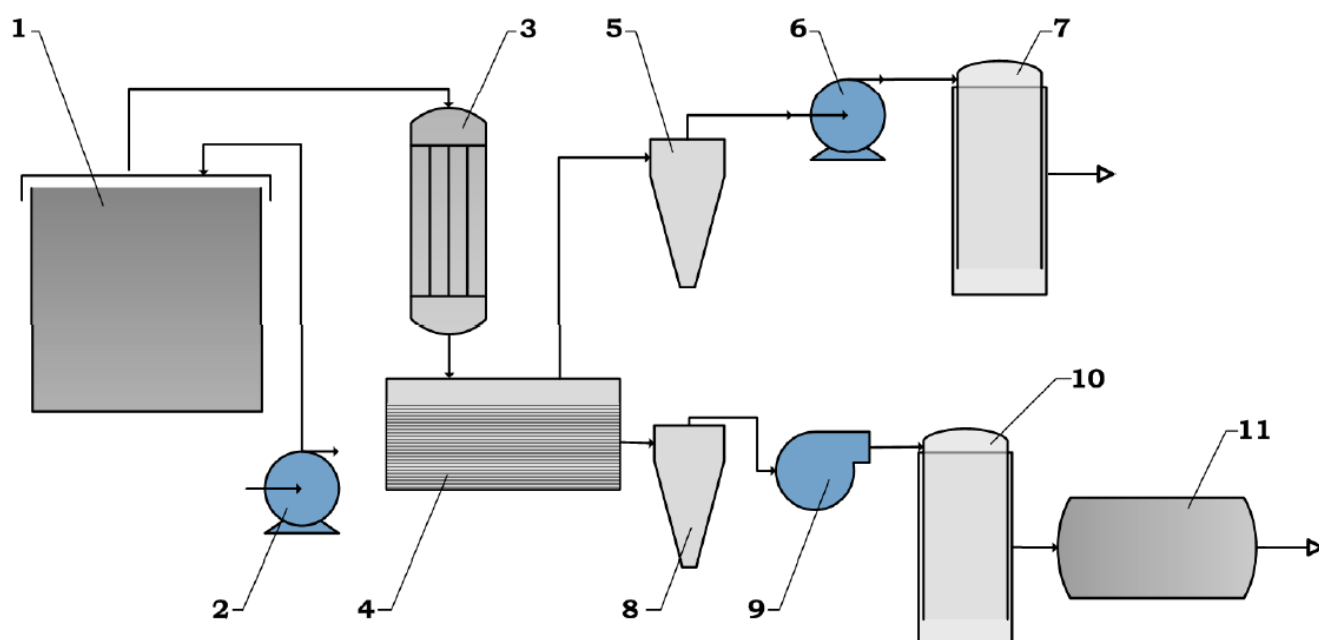


Рисунок 91 – Реакторная линия для переработки органических отходов

В ходе экспериментальных исследований на реакторной линии было установлено, что внутри реакторов в составе технологической реакторной линии можно также осуществлять завихрение потока с помощью разработанного универсального перемешивающего устройства [201], что способствует повышению выхода целевого продукта, а также улучшению теплообмена между контактирующими средами.

4.4 Выводы

1. Предложена технологическая операция замыкания контура металлического листа малой толщины с термоконтактной поверхностью путем формирования фиксирующего замка. Определено усилие, необходимое для формирования и упрочнения замка термоконтактной поверхности при изготовлении на производстве. Данная операция рекомендована для замыкания контура металлического листа с термоконтактной поверхностью малой толщины.

2. Показано влияние различных видов механической обработки склеиваемых поверхностей (пескоструйная обработка, шлифование, фрезерование) на прочность адгезионного соединения. Наиболее высокие показатели прочности достигаются при шероховатости, полученной путем фрезерования. При увеличении нагрузки при склеивании в случае шлифования и фрезерования происходит увеличение прочности адгезионного соединения, а также смещение максимальной прочности в сторону увеличения шероховатости. Также показано влияние температуры сушки клеевого шва на время отверждения. Определено время равновесного смачивания, при достижении которого можно производить сушку повышенными температурами. Предложен способ расчета прочности клеевого соединения при производстве комбинированного теплообменного элемента.

3. Представлена схема многосекционного реактора пиролиза, использование которого в совокупности с комбинированным теплообменным элементом позволяет достичь высоких показателей эффективности при переработке органических отходов. В качестве дополнительного устройства интенсификации теплообмена необходимо использовать завихрители газового потока (теплоносителя), а также универсальные перемешивающие устройства. Для расширения разнообразия получаемых веществ целесообразно применять несколько реакторов в составе реакторной линии. На первой ступени обеспечивается получение жидких и газообразных углеводородов, на второй ступени – водорода как экологически чистого топлива.

5 ПРОМЫШЛЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

С целью использования результатов экспериментальных исследований, полученных в настоящем диссертационном исследовании, были произведены промышленные испытания по образованию термоконтактной поверхности и сборке двухэлементного корпуса теплообменного оборудования с применением продольно-строгального и радиально-сверлильного станков, а также специальной технологической оснастки с выполнением операций гибки, вальцовки и механической обработки (образование шероховатости).

Внедрение технологии изготовления двухэлементного корпуса в виде комбинированного теплообменного элемента в ООО «СКБ Механика» (г. Красноярск) позволило сократить затраты на обслуживание и ремонт тепломассообменного оборудования. Использование комбинированного теплообменного элемента также способствовало снижению энергетических потребностей, направленных на нагрев исходного вещества. В частности, эффективность применения была установлена на теплообменниках типа «труба в трубе» и установках нефтехимического синтеза.

В рамках промышленных испытаний для нужд предприятий Красноярска и Красноярского края получены образцы следующего технологического оборудования различного назначения с использованием двухэлементного корпуса в виде комбинированного теплообменного элемента:

1. Модифицированные кожухотрубные теплообменники для нефтеперерабатывающей отрасли, применяемые в качестве нагрева нефтяного сырья.

2. Мобильные установки термической деструкции твердых бытовых органических отходов и углеводородных промышленных отходов для получения альтернативных и экологичных источников энергии и ценных продуктов.

3. Универсальные газовые котлы для нагрева теплоносителя, используемого в качестве отопителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 $T = 600,87$ °С.

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 термодетальной 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 $\sim 3,2$ 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 термодетальной 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 тепломассообменного 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мхитаров, Р.А. Технологии и оборудование для переработки отходов нефтепереработки, нефтешламов и загрязненных грунтов / Р.А. Мхитаров // Нефть. Газ. Новации. – 2013. – № 10. – С. 72–76.
2. Определение класса опасности нефтешламов / В.В. Ермаков, А.Н. Сухонослова, Д.Е. Быков, Д.А. Пирожков // Экология и промышленность России. – 2008. – № 9. – С. 14–16.
3. Шпербер, Е.Р. Некоторые виды отходов нефтеперерабатывающих заводов и их классификация / Е.Р. Шпербер // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2011. – № 2. – С. 27–33.
4. Дубовцев, Д.А. Нефтешалмы: хранение и накопление. Вопросы безопасности и утилизации / Д.А. Дубовцев, У.Э. Аллаяров, Э.Н. Абдрахманова // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2019. – № 5. – С. 31–47.
5. Лофлер, М. Направления использования нефтешламов в дорожном строительстве / М. Лофлер, В.Г. Шелегов, Н.А. Слободчикова // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2018. – Т. 8, № 4. – С. 98–104.
6. 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.
7. Бахонина, Е.И. Современные технологии переработки и утилизации углеводородсодержащих отходов. Сообщение 1. Термические методы утилизации и обезвреживания углеводородсодержащих отходов / Е.И. Бахонина // Башкирский химический журнал. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 20–29.
8. Чалов, К.В. Каталитический пиролиз нефтешламов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.04 / Чалов Кирилл Вячеславович. – Тверь, 2013. – 149 с.
9. Медведев, А.В. Исследование возможности применения метода пиролиза для утилизации нефтяных отходов / А.В. Медведев // Интернет-журнал Науковедение. – 2014. – № 5. – 11 с.

10. Расстегаев, А.Н. Технология утилизации нефтесодержащих отходов методом пиролиза / А.Н. Расстегаев, В.В. Голубовский // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – № 12. – С. 231–233.

11. 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.

12. 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.

13. Коленчуков, О.А. Разработка технологических энергосберегающих систем на основе пиролизных реакторов / О.А. Коленчуков, Э.А. Петровский // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 130–136.

14. Саликов, П.Ю. Пиролизная утилизация использованных изделий из полиэтилентерефталата / П.Ю. Саликов // Экология и промышленность России. – 2014. – № 3. – С. 16–20.

15. Моделирование полупромышленной установки по утилизации жидких нефтяных отходов термомеханическим методом / А.Г. Сафиулина, И.Ш. Хуснутдинов, А.З. Бакирова [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 15, № 10. – С. 270–271.

16. Pyrolysis of oil-plant wastes in a TGA and a fixed-bed reactor: Thermochemical behaviors, kinetics, and products characterization / J. Chen, X. Fan, B. Jiang [et al.] // Bioresource Technology. – 2015. – Vol. 192. – P. 592–602.

17. Ayanoglu, A. Production of gasoline and diesel like fuels from waste tire oil by using catalytic pyrolysis / A. Ayanoglu, R. Yumrutas // Energy. – 2016. – Vol. 103. – P. 456–468.

18. Miskolczi, N. Thermo-catalytic co-pyrolysis of recovered heavy oil and municipalplastic wastes / N. Miskolczi, F. Ates // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2016. – Vol. 117. – P. 273–281.

19. Progress of the development of reactors for pyrolysis of municipal waste / M. Gholizadeh, C. Li, S. Zhang [et al.] // Sustainable Energy and Fuels. – 2020. – № 4. – P. 5885–5915.

20. Золотарев, Г.М. Утилизация углеродосодержащих отходов. Пиролизные установки / Г.М. Золотарев // Твердые бытовые отходы. – 2011. – № 4. – С. 26–31.

21. Токарев, Ю.И. Переработка нефтешламов / Ю.Т. Токарев, Р.В. Андреев, К.М. Длигач // Экспозиция. Нефть. Газ. – 2015. – № 2. – С. 66–67.

22. Реактор для переработки органических шламов / А.В. Медведев, И.О. Коровин, Р.Р. Багабиев, В.Д. Шантарин // Известия высших учебных заведений. Нефть и Газ. – 2003. – № 3. – С. 111–114.

23. Анализ применимости различных технологий переработки нефтешламов в условиях ПАО «Татнефть» / Л.Н. Шакирова, И.И. Уразов, Ф.Р. Губайдулин [и др.] // Сборник научных трудов ТатНИПИнефть. – 2021. – Т. LXXXIX. – С. 302–309.

24. Установка термической деструкции УТД-2-1000 (вращающийся реактор) // I-PEC.RU. – URL: <https://i-pec.ru/equipments/ustanovka-termicheskoy-destrukcii-utd-2-1000-vrashhayushhijsya-reaktor> (дата обращения: 08.10.2023).

25. Пиролизная установка для продажи // BESTONGROUP.COM. – URL: <https://www.bestongroup.com/ru/pyrolysis-plant-for-sale/> (дата обращения: 08.10.2023).

26. Oil Sludge Pyrolysis Plant // KINGTIGERGROU.P.COM. – URL: <https://kingtigergroup.com/oil-sludge-pyrolysis-plant/> (дата обращения: 08.10.2023).

27. Pyrolyze Products // PYROLYZE.COM. – URL: <https://pyrolyze.com/product-categorie/pyrolyze-products/> (дата обращения: 08.10.2023).

28. Анализ современных технологий переработки и утилизации углеводородных отходов термическими способами / О.А. Коленчуков, К.А. Башмур, Е.Д. Агафонов [и др.] // SOCAR Proceedings. – 2023. – № 2. – С. 127–137.

29. Пат. 2225573 Российская Федерация, МПК F23G 5/027, F23G 7/00. Установка для пиролиза углеводородных отходов / Глушков В.А.; заявитель и патентообладатель Глушков Владимир Александрович. – № 2002120394/03; заявл. 29.07.2002; опубл. 10.03.2004. Бюл. № 7. – 7 с.

30. Пат. 2451039 Российская Федерация, МПК C08J 11/00, F23G 7/05, C10G 9/08, C10G 9/42. Устройство для переработки отходов нефти с высоким содержанием кислотосодержащих веществ и тяжелых парафинов в полезную продукцию / Насонов А.Е.; заявитель и патентообладатель Насонов Александр Ефимович. – № 2010154601/05; заявл. 30.12.2010; опубл. 10.06.2011. Бюл. № 14. – 7 с.

31. Пат. 2406031 Российская Федерация, МПК F23G 5/00. Реактор для переработки органических отходов и нефтешламов / Масленников В.В., Баженов В.И., Зудилин Н.А.; заявитель и патентообладатель Масленников Владимир Васильевич. – № 2009130472/03; заявл. 11.08.2009; опубл. 10.12.2010. Бюл. № 34. – 8 с.

32. Пат. 2392543 Российская Федерация, МПК F23G 5/027, F23G 5/20. Способ и устройство переработки бытовых и промышленных органических отходов / Гага С.Г.; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Финансово–промышленная группа «Тезаурум». – № 2008107014/03; заявл. 22.02.2008; опубл. 20.06.2010. Бюл. № 17. – 16 с.

33. Пат. 2534421 Российская Федерация, МПК F23G 7/05. Реактор для утилизации отработанных масел / Шаповалов Ю.Н., Саликов П.Ю., Локтева Е.С., Хоненко В.А.; заявитель и патентообладатель Шаповалов Юрий Николаевич. – № 2012134169/03; заявл. 09.08.2012; опубл. 27.11.2014. Бюл. № 33. – 9 с.

34. Шангареев, Р.Р. Ликвидация донных отложений нефтешламовых амбаров с применением новой плазмохимической технологии: дис. ... канд. техн. наук: 11.00.11. – Уфа, 2000. – 115 с.

35. Копачев, А.Г. Разработка технологии и оборудования для экологически безопасной переработки твердых органосодержащих отходов коммунального

хозяйства с использованием среднетемпературного пиролиза: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13, 05.17.08 / Копачев Алексей Геннадьевич. – Москва, 2001. – 169 с.

36. Медведев, А.В. Разработка электродуговой пиролизной утилизации осадков сточных вод городских очистных сооружений: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.36 / Медведев Андрей Витальевич. – Тюмень, 2003. – 187 с.

37. Глушков, В.А. Разработка и исследование автоматизированной установки пиролиза растительного сырья с целью повышения выхода топливного газа: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Глушков Владимир Александрович. – Ижевск, 2006. – 113 с.

38. Прокопьев, С.А. Разработка технологии ультраоксипиролиза древесной биомассы для получения бионефти и древесного угля: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03 / Прокопьев Сергей Анатольевич. – Санкт-Петербург, 2007. – 205 с.

39. Бахонина, Е.И. Разработка адаптивной технологии переработки углеводородсодержащих отходов нефтехимии с использованием электромагнитного излучения СВЧ-диапазона: дис. ... канд. техн. наук: 02.00.13 / Бахонина Елена Игоревна. – Уфа, 2008. – 115 с.

40. Косивцов, Ю.Ю. Низкотемпературный каталитический пиролиз органического сырья: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.04 / Косивцов Юрий Юрьевич. – Тверь, 2011. – 415 с.

41. Сафиулина, А.Г. Разработка технологии обезвоживания жидких нефтяных отходов и высокоустойчивых водонефтяных эмульсий: дис. ... канд. техн. наук: 02.00.13 / Сафиулина Алия Габделфаязовна. – Москва, 2013. – 157 с.

42. Мустафин, И.А. Разработка установки утилизации нефтяных шламов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07 / Мустафин Ильдар Ахатович. – Уфа, 2013. – 135 с.

43. Расстегаев, А.Н. Технология термического обезвреживания нефтесодержащих и формальдегидсодержащих твердых отходов безокислительным способом: дис. ... канд. техн. наук: 03.02.08 / Расстегаев Александр Николаевич. – Пенза, 2014. – 142 с.

44. ГОСТ 34347–2017. Сосуды и аппараты стальные сварные. – М.: Сандартинформ, 2018. – 104 с.
45. Технология газонефтяного нефтехимического машиностроения: учеб. пособие / Б.М. Базров, Б.А. Авербух, Я.А. Каминский, В.Н. Потасов. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
46. Технологические процессы в машиностроении: учеб. пособие / под общ. ред. В.А. Вагнера. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. – 592 с.
47. Суслов, А.Г. Технология машиностроения: учебник / А.Г. Суслов. – М.: КНОРУС, 2013. – 336 с.
48. Копылов, Ю.Р. Технология машиностроения / Ю.Р. Копылов. – Воронеж: ВГТУ, 2010. – 247 с.
49. Интенсификация теплообмена. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования: монография / Ю.Ф. Гортышов, И.А. Попов, В.В. Олимпиев, А.В. [и др.]; под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.
50. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / Г. С. Борисов, В. П.Брыков, Ю. И. Дытнерский [и др.]; под общ. ред. Ю.И. Дытнерского. – М.: Химия, 1983. – 272 с.
51. Попов, И.А. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (обзор) / И.А. Попов, Ю.Ф. Гортышов, В.В. Олимпиев // Теплоэнергетика. – 2012. – № 1. – С. 3–14.
52. Попов, И.А. Интенсификация теплообмена. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: монография / И.А. Попов, Х.М. Махьянов, В.М. Гуреев; под. общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 560 с.
53. Ризванов, Р.Г. Обеспечение качества оболочковых конструкций повышением точности изготовления и сборки базовых деталей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.13 / Ризванов Риф Гарифович. – Уфа, 2002. – 354 с.

54. Паршин, С.В. Разработка технологии и машины для изготовления производства низкопрофильных витых труб: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Паршин Сергей Владимирович. – Екатеринбург, 2003. – 201 с.

55. Гуров, Р.В. Технологическое увеличение поверхности теплообмена: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Гуров Роман Владимирович. – Брянск, 2003. – 186 с.

56. Ремнев, А.И. Ресурсосберегающие технологии изготовления и сборки элементов теплообменных систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / Ремнев Алексей Ильич. – Тула, 2007. – 459 с.

57. Зарипов, М.З. Модернизация технологии изготовления сварных аппаратов из стали 12Х18Н10Т с применением вибрационной обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Зарипов Марс Зульфатович. – Уфа, 2010. – 125 с.

58. Шимов, Г.В. Разработка технологии финишной обработки теплообменных труб из нержавеющей стали: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Шимов Георгий Викторович. – Екатеринбург, 2013. – 178 с.

59. Литвинова, Т.А. Современные способы обезвреживания и утилизации нефтесодержащих отходов для ликвидации загрязнения окружающей среды / Т.А. Литвинова // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – № 123. – 15 с.

60. Методы утилизации нефтяных шламов / И.Ш. Хуснутдинова, А.Г. Сафиулина, Р.Р. Заббаров, С.И. Хуснутдинов // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58, № 10. – С. 3–20.

61. Мингалев, А.О. Современное состояние исследований переработки нефтешламов / А.О. Мингалев // Вестник современных исследований. – 2018. – № 12. – С. 271–276.

62. Goodarzi, K. Исследование влияния турбулизирующих вставок на интенсификацию теплообмена / K. Goodarzi, S.Y. Goudarzi, Gh. Zendehbudi // Теплоэнергетика. – 2015. – № 1. – С. 69–76.

63. Рейхсфельд, В.О. Реакционная аппаратура и машины заводов основного органического синтеза и синтетического каучука: учеб. пособие / В.О. Рейхсфельд, В.С. Шеин, В.И. Ермаков. – 2-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1985. – 264 с.

64. Вишневский, Я.С. Технология ручнойковки: учебник для средних проф.-техн. училищ / Я.С. Вишневский. – Изд. 3-е, доп. – М.: Высшая школа, 1976. – 288 с.
65. Бегишев, А.М. Применение аддитивных технологий при проектировании и изготовлении шнеков в насосах ТНА ЖРД / А.М. Бегишев, А.С. Торгашин, А.Ю. Леонгард // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – № 12. – 183–184.
66. Гевко, Б.М. Технология изготовления спиралей шнеков / Б.М. Гевко. – Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1986. – 128 с.
67. Берглес, А.Е. Интенсификация теплообмена. Теплообмен / А.Е. Берглес // Достижения проблемы. Перспективы: избранные труды 6-й Международной конференции по теплообмену: пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – С. 145–192.
68. Гухман, А.А. Интенсификация конвективного теплообмена и проблема сравнительной оценки теплообменных поверхностей / А.А. Гухман // Теплоэнергетика. – 1977. – № 7. – С. 5–8.
69. Леонтьев, А.И. Влияние интенсификаторов теплообмена на теплогидравлические свойства каналов / А.И. Леонтьев, В.В. Олимпиев // Теплофизика высоких температур. – 2007. – № 6. – С. 925–953.
70. Леонтьев, А.И. Эффективные интенсификаторы теплоотдачи для ламинарных (турбулентных) потоков в каналах энергоустановок / А.И. Леонтьев, Ю.Ф. Гортышов, В.В. Олимпиев, И.А. Попов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2005. – № 1. – С. 75–91.
71. Лаптев, А.Г. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов: учебно-справочное пособие / А.Г. Лаптев, Н.А. Николаев, М.М. Башаров. – М.: Теплотехника, 2011. – 335 с.
72. Мигай, В.К. Моделирование теплообменного и энергетического оборудования / В.К. Мигай. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 263 с.
73. Мигай, В.К. Повышение эффективности современных теплообменников / В.К. Мигай. – Л.: Энергия, 1980. – 144 с.

74. Леонтьев, А.И. Потенциал энергосбережения различных способов закрутки потока и дискретно шероховатых каналов (обзор) / А.И. Леонтьев, В.В. Олимпиев // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2010. – № 1. – С. 13–49.

75. Технологический процесс и оснастка для ударного формирования дискретных неровностей на поверхностях теплообменных труб / Н.Н. Хованов, В.М. Ефимов, В.С. Попов, С.А. Петриков // Машиностроение и инженерное образование. – 2007. – № 2. – С. 29–33.

76. Кунтыш, В.Б. Устройство для промышленной накатки на внутренней поверхности несущей трубы винтовых плавноочерченных выступов в биметаллической ребристой трубе / В.Б. Кунтыш, А.Б. Сухоцкий, В.П. Мулин // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2018. – № 1. – С. 71–77.

77. Миндрин, В.И. Производство ребристых труб методов поперечно-винтовой прокатки / В.И. Миндрин // Производство проката. – 2016. – № 5. – С. 28–34.

78. Технология конструктивных материалов: учебник для машиностроительных специальностей вузов / А.М. Дальский, И.А. Арутюнова, Т.М. Барсукова [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 448 с.

79. Освоение технологии изготовления горячепрессованных труб с винтообразным оребрением внутренней поверхности / Я.И. Космацкий, В.В. Ананян, А.М. Зубков, А.С. Тумашев // Бюллетень «Черная металлургия». – 2016. – № 11. – С. 66–69.

80. Космацкий, Я.И. Основные направления исследований в области совершенствования теории, технологии и оборудования трубопрессовых систем / Я.И. Космацкий // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2016. – № 1. – С. 42–46.

81. Константинов, И.Л. Прокатно-прессово-волочильное производство: учебник 2-е изд. / И.Л. Константинов, С.Б. Сидельников, Е.В. Иванов. – М.: Инфра-М; Красноярск: Сиб. Федер. ун-т, 2014. – 511 с.

82. Воронцов, А.Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие / А.Л. Воронцов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 396 с.

83. Пастушенко, Т.С. Кручение в процессах волочения труб / Т.С. Пастушенко, Б.В. Каргин // Современные трудоемкие технологии. – 2016. – № 6. – 3 с.

84. Мороз, И.И. Электрохимическая обработка металлов / И.И. Мороз, Г.А. Алексеев. – М.: Машиностроение, 1969. – 208 с.

85. Гафаров, А.М. Обработка металлов вибронакатыванием / А.М. Гафаров, А.Ш. Шихсеидов. – Баку: Элм, 1999. – 203 с.

86. Пат. 2727127 Российская Федерация, МПК В24В 39/02. Способ накатывания регулярного рельефа на внутренней поверхности труб и устройство для его осуществления / Петровский Э.А., Зенченко С.В., Башмур К.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». – № 2020101248; заявл. 10.01.2020; опубл. 20.07.2020. Бюл. № 20. – 9 с.

87. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочник / Б.Г. Борисов, К.Б. Борисов, В.М. Бродянский [и др.]. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 632 с.

88. Промышленные тепломассообменные процессы и установки / А.М. Бакластов, В.А. Горбенко, О.Л. Данилов [и др.]; под ред. А.М. Бакластова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.

89. Мосин, Ф.В. Технология изготовления деталей из труб / Ф.В. Мосин. – М.–Л.: Маш-гиз, 1962. – 173 с.

90. Тменов, Д.Н. Интенсификация процессов пиролиза / Д.Н. Тменов, С.П. Гориславец. – Киев: Техника, 1978. – 192 с.

91. Kocurek, R. Manufacturing technologies of finned tubes / R. Kocurek, J. Adamiec // Advances in materials science. – 2013. – № 3. – P. 26–36.

92. Технологические процессы формирования ребер на толстостенных трубах / А.И. Ремнев, А.А. Фадеев, Л.А. Ремнева [и др.] // Современные

инструментальные системы, информационные технологии и инновации. – 2012. – С. 335–343.

93. Берлинер, Ю.И. Технология химического и нефтяного аппаратостроения / Ю.И. Берлинер, Ю.А. Балашов. – М.: Машиностроение, 1976. – 256 с.

94. Афанасьева, И.В. Существующие технологии оребрения труб / И.В. Афанасьева // Электронный научный журнал Инженерный вестник Дона. – 2007. – № 1. – 18 с.

95. Молоканов, Ю.К. Процессы и аппараты нефтегазопереработки: учебник для техникумов / Ю.К. Молоканов. – 2-е изд. – М.: Химия, 1987. – 368 с.

96. Пат. 2679815 Российская Федерация, МПК В21D 53/02. Способ получения развитой штырьковой теплообменной поверхности / Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана». – № 2017146802; заявл. 28.12.2017; опубл. 13.02.2019. Бюл. № 5. – 7 с.

97. Пат. 2279618 Российская Федерация, МПК F28F 1/10. Теплообменный элемент и способ его изготовления / Митюхин Ф.П.; заявитель и патентообладатель Митюхин Федор Петрович. – № 2004123325/06; заявл. 27.01.2006, опубл. 10.07.2006. Бюл. № 19. – 10 с.

98. Пат. 2377490 Российская Федерация, МПК F28F 1/10, F28F 1/42. Теплообменный элемент и способ изготовления теплообменного элемента / Клеутин Д.Н., Глазунов М.И., Старых А.Г., Сокол В.Я.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Томир». – № 2008141785/06; заявл. 21.10.2008; опубл. 10.07.2006. Бюл. № 36. – 7 с.

99. Пат. 2703921 United States, МПК F28F 1/42, В21С 37/225, F28D 7/103, F28D 7/106, F28D 7/106, F28F 1/14, F28F 13/18, Y10S 220/921, Y10T 29/49361, Y10T 29/49378. Method of making internally finned tubes / Brown J.W.; заявитель и патентообладатель Brown Jr John W. – № 87466; заявл. 14.04.1949; опубл. 15.03.1955. – 8 с.

100. Пат. 2095719 Российская Федерация, МПК F28F 1/14, H05B 3/50. Теплообменный элемент, способ его изготовления и устройство для его осуществления / Подхорски М., Шрей Х-Г., Блум Й., Хольтен В.; заявитель и патентообладатель Балке-Дюрр АГ. – № 92004591/07; заявл. 11.12.1991; опубл. 10.11.1997. – 5 с.

101. Recent Advances in Experimental Techniques for Flow and Mass Transfer Analyses in Thermal Separation Systems / U. Hampel, M. Schubert, A. Döß [et al.] // *Chemie Ingenieur Technik*. – 2020. – Vol. 92, № 7. – P. 926–948.

102. Pyrolysis of Oil Sludge with Oil Sludge Ash Additive Employing a Stirred Tank Reactor / S. Cheng, Y. Wang, N Gao [et al.] // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2016. – Vol. 120. – P. 511–520.

103. Yansaneh, O.Y. Recent Advances on Waste Plastic Thermal Pyrolysis: A Critical Overview / O.Y. Yansaneh, S.H. Zein // *Processes*. – 2022. – Vol. 10, № 2. – P. 332.

104. Kubba, S. Chapter Nine–Impact of Energy and Atmosphere. In *Handbook of Green Building Design and Construction* / S. Kubba. – USA, MA: Heinemann: Cambridge, 2017. – P. 443–571.

105. Dunker, A.M. Production of Hydrogen by Thermal Decomposition of Methane in a Fluidized-Bed Reactor – Effects of Catalyst, Temperature, and Residence Time // A.M. Dunker, S. Kumar, P.A. Mulawa // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2006. – Vol. 31, № 4. – P. 473–484.

106. Unraveling the radical chain mechanism in the pyrolysis of β -O-4 linked lignin: The role of aliphatic substituents / W.-L. Xie, B. Hu, Y. Liu [et al.] // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2023. – Vol. 39, № 3. – P. 3303–3311.

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

108. 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.

109. Томилов, М.Ф. Повышение эффективности процесса формообразования деталей из листа эластичной средой в жесткой матрице: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Томилов Марат Федорович. – Воронеж, 1999. – 193 с.

110. Резников, А.Н. Тепловые процессы в технологических системах: учеб. / А.Н. Резников, Л.А. Резников. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 292 с.

111. Солнцев, В.П. Экспериментальное исследование теплообмена на поверхности с шероховатостью различного относительного шага / В.П. Солнцев, В.Н. Крюков // Тепло- и массообмен при взаимодействии потока с поверхностью. МАИ. – 1978. – № 463. – С. 3–6.

112. Zlobin, A.V. Hydraulic Resistance of Pipes with Uniform Continuous Roughness in the Form of a Metric Thread of Varying Profile and an Inserted Twisted Tape / A.V. Zlobin, S.É. Tarasevich // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2020. – № 93. – P. 1226–1232.

113. Тарасевич, С.Э. Гидродинамика и теплообмен при движении однофазной жидкости в трубах с искусственной шероховатостью / С.Э. Тарасевич, А.В. Злобин, А.Б. Яковлев // Теплофизика высоких температур. – 2015. – Т. 53, № 6. – С. 938–952.

114. Kendil, F.Z. Assessment of three turbulence model performances in predicting water jet flow plunging into a liquid pool / F.Z. Kendil, A.B. Salah, A. Mataoui // Nuclear Technology and Radiation Protection. – 2010. – № 1. – P. 13–22.

115. 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.

116. Song, W. Tri-reforming of methane over Ni catalysts for CO₂ conversion to Syngas with desired H₂CO ratios using flue gas of power plants without CO₂ separation

/ W. Song, W. Pan, Srimat S.T. et al // Studies in Surface Science and Catalysis. – 2004. – Vol. 153. – P. 315–322.

117. Щелчков, А.В. Физическое и численное моделирование интенсификации теплообмена поверхностными генераторами вихрей в трактах систем охлаждения: дис. ... д-ра. техн. наук: 01.04.14 / Щелчков Алексей Валентинович. – Казань, 2017. – 310 с.

118. Numerical Investigation of Flow and Heat Transfer in Rectangular Microchannels with and without Semi-Elliptical Protrusions / H. Sun, H. Fu, L. Yan [et al.] // Energies. – 2022. – Vol. 13, № 15. – 30 p.

119. Громов, Н.П. Теория обработки металлов давлением / Н.П. Громов. – М.: Металлургия, 1978. – 360 с.

120. Реут, Л.Е. Теория напряженного и деформированного состояния с примерами и задачами: учеб.-метод. пособие / Л.Е. Реут. – Минск: БНТУ, 2008. – 107 с.

121. Теория прокатки / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.

122. Прочность, устойчивость, колебания: справочник в 3 т. Т. 1 / Б.Л. Абрамян, Н.Х. Арутюнян, И.А. Биргер [и др.]. – М.: Машиностроение, 1968. – 832 с.

123. Вайнберг, Д.В. Расчет пластин / Д.В. Вайнберг, Е.Д. Вайнберг. – Киев: Будивельник, 1970. – 436 с.

124. Мазур, В.Л. Горячая прокатка полос с применением технологической смазки: научные основы, промышленная практика / В.Л. Мазур, В.И. Тимошенко // Сталь. – 2018. – № 4. – С. 21–27.

125. Шаталов, Р.Л. Влияние смазок на деформационные, силовые показатели и размеры медных и латунных листов при прокатке / Р.Л. Шаталов, А.С. Лукаш, К.В. Чан // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2019. – № 12. – С. 125–128.

126. Грудев, А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справочник / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.

127. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
128. Склеивание в машиностроении / Д.А. Аронович, В.П. Варламов, В.А. Войтович [и др.]; под общ. ред. Г.В. Малышевой. – М.: Наука и технологии, 2005. – 544с.
129. Кардашов, Д.А. Синтетические клеи / Д.А. Кардашов. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Химия, 1976. – 504 с.
130. Пинчук, Л.С. Полимерные пленки, содержащие ингибиторы коррозии / Л.С. Пинчук, А.С. Неверов. – М.: Химия, 1993. – 176 с.
131. Ковалевская, Ж.Г. Структура и свойства поверхностных слоев и покрытий при модифицирующей ультразвуковой обработке: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.16.09 / Ковалевская Жанна Геннадьевна. – Томск, 2018. – 334 с.
132. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя детали / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
133. Гуль, В.Е. Микрореологические представления об адгезии пленочных полимерных материалов / В.Е. Гуль, С.В. Генель // Адгезия и прочность адгезионных соединений: сб. науч. тр. – М.: МДНТП, 1968. – Ч. 1. – С. 30–38.
134. Горюнов, Ю.В. Физико-химические закономерности распространения жидкого металла по твердой металлической поверхности / Ю.В. Горюнов // Успехи химии. – 1964. – Т. 33. Вып. 9. – С. 1062–1084.
135. Jonson, R.E. Hysteresis of contact angle / R.E. Jonson, H.D. Robert // Advances in Chemistry Series 43. Ed. R.F. Gould. – Washington: American Chemical Society. – 1964. – P. 112–144.
136. Сумм, Б.Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б.Д. Сумм, Ю.В. Горюнов. – М.: Химия, 1976. – 232 с.
137. Лабораторные работы и задачи по коллоидной химии / Ю.Г. Фролов, А.С. Градский, В.В. Назаров [и др.]; под ред. Ю.Г. Фролова и А.С. Градского. – М.: Химия, 1986. – 216 с.
138. Москвитин, Н.И. Физико-химические основы процессов склеивания и прилипания / Н.И. Москвитин. – М.: Лесная промышленность, 1974. – 191 с.

139. Зимон, А.Д. Адгезия жидкости и смачивание / А.Д. Зимон. – М.: Химия, 1971. – 416 с.
140. Берлин, А.А. Основы адгезии полимеров / А.А. Берлин, В.Е. Басин. – Изд. 2-е. – М.: Химия, 1974. – 350 с.
141. Вакула, В.Л. Физическая химия адгезии полимеров / В.Л. Вакула, Л.М. Притыкин. – М.: Химия, 1974. – 392 с.
142. Русанов, А.И. Эффекты шероховатости в обобщенном уравнении Юнга / А.И. Русанов // Коллоидный журнал. – 1998. – Т. 60, № 6. – С. 815–820.
143. Гуль, В.Е. Структура и механические свойства полимеров / В.Е. Гуль. – М.: Высшая школа, 1979. – 352 с.
144. Кейгл, Ч. Клеевые соединения / Ч. Кейгл. – М.: Мир, 1971. – 200 с.
145. Packham, D.E. Work of adhesion: contact angles and contact mechanics // D.E. Packham // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 1996. – Vol. 16. – P. 121–128.
146. Москвитин, Н.И. Склеивание полимеров / Н.И. Москвитин. – М.: Лесная промышленность, 1968. – 304 с.
147. Быховский, И.А. Влияние заданного рельефа на кинетику растекания жидкости по твердой поверхности / И.А. Быховский, А.Ю. Пролесковская // Поверхностная диффузия и растекание: сб. науч. тр. – М.: Наука. – 1969. – С. 193–199.
148. Адгезия низкомолекулярных соединений. Теория и практика / Л.М. Притыкин, А.Н. Любченко, О.Б. Селютин [и др.]. – СПб.: СПб. гос. ун-т. (Институт химии), 1998. – 348 с.
149. Научные основы износостойкости трибоэлектрохимических покрытий хромом / Н.М. Мамаев, В.Ф. Кукоз, М.Н. Мамаев, А.В. Ременцов // Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2010. – № 5. – С. 44–48.
150. Тимонин, А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования: справочник / А.С. Тимонин. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. – 852 с.

151. Зрунек, М. Противокоррозионная защита металлических конструкций / М. Зрунек; пер. с чеш. Л.М. Левина. – М.: Машиностроение, 1984. – 135 с.
152. Справочник машиностроителя: в 6 т. Том 5 / Н.С. Ачеркан, М.П. Вукаловчи, В.Н. Кудрявцев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1964. – 452 с.
153. Денисов, В.П. Производство электрических источников света / В.П. Денисов. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
154. Прикладная электрохимия / Р.И. Агладзе, Н.Т. Гофман, Н.Т. Кудрявцев [и др.]. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Химия, 1975. – 552 с.
155. Шкержик, Я. Рецептурный справочник для электротехника: пер. с чешск. – 2-е изд., доп. / Я. Шкержик. – М.: Энергия, 1978. – 160 с.
156. Королев, Ю.В. Защита оборудования от коррозии / Ю.В. Королев, В.Е. Путилов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 136 с.
157. Кoryтова, М.С. Технология конструкционных материалов / М.С. Кoryтова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 234 с.
158. Вайнер, Я.В. Технология электрохимических покрытий / Я.В. Вайнер, М.А. Дасоян. – М.–Л.: Ж. Машгиз, 1962. – 468 с.
159. Клеи и технология склеивания деталей в машиностроении: учеб. пособие / В.Ф. Каблов, В.А. Носенко, Н.А. Кейбал, С.Н. Бондаренко. – Старый Оскол: ТНТ, 215. – 188 с.
160. Дасоян, М.А. Производство электрических аккумуляторов / М.А. Дасоян, В.В. Новодережкин, Ф.Ф. Томашевский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1977. – 381 с.
161. Краткий справочник металлиста / П.Н. Орлов, Е.А. Скороходов, А.Д. Агеев [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987. – 960 с.
162. Технология склеивания деталей в самолетостроении / И.И. Капелюшник, И.И. Михалев, Б.Д. Эйдельман. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1972. – 224 с.
163. Зинина, И.Н. Влияние качества поверхности на прочность адгезионных соединений / И.Н. Зинина, М.В. Вартанов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2000. – № 2. – С. 28–29.

164. Игнатов, А.В. Подготовка поверхностного слоя детали при сборке клеевых соединений в машиностроении / А.В. Игнатов // Мир измерений. – 2014. – № 12. – С. 25–32.

165. Игнатов, А.В. Исследование технологического способа повышения качества сборки регулируемых цилиндрических клеевых соединений / А.В. Игнатов, М.Э. Винокурова // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2017. – № 6. – С. 42–55.

166. Зубков, Н.Н. Использование развитых микрорельефов для качественного повышения прочности клеевых соединений низкоадгезионных материалов / Н.Н. Зубков // Клеи. Герметики. Технологии. – 2015. – № 8. – С. 17–23.

167. Зинина, И.Н. Технологическое обеспечение качества адгезионных соединений на основе учета влияния микропрофиля поверхностей деталей: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08; 05.03.01 / Зинина Инна Николаевна. – Москва, 2003. – 220 с.

168. Ковачич, Л. Склеивание металлов и пластмасс / Л. Ковачич; под ред. А.С. Фрейдина. – М.: Химия, 1985. – 240 с.

169. Кинлок, Э. Адгезия и адгезивы: Наука и технологии / Э. Кинлок. – М.: Мир, 1991. – 484 с.

170. Игнатов, А.В. Формирование технологического процесса сборки клеевого соединения / А.В. Игнатов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2000. – № 2. – С. 24–27.

171. Чудновский, А.Р. Изготовление и обработка из пластмасс: научное издание / А.Р. Чудновский, Н.Я. Кестельман, Л.С. Ахмечет. – М.: Машиностроение, 1967. – 99 с.

172. Barbeau, H. Wilfred. Loctite Handbook Second Edition / W.H. Barbeau, J. Cocco, S. Cowdrey. – Loctite European Group, 1998. – 460 p.

173. Винокурова, М.Э. Сборка регулируемых цилиндрических клеевых соединений: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Винокурова Маргарита Эдуардовна. – Москва, 2017. – 133 с.

174. Хрулев, В.М. Прочность клеевых соединений / В.М. Хрулев. – М.: Стройиздат, 1973. – 81 с.
175. Басин, В.Е. Адгезионная прочность / В.Е. Басин. – М.: Химия, 1981. – 208 с.
176. Фрейдин, А.С. Свойства и расчет адгезионных соединений / А.С. Фрейдин, Р.А. Турусов. – М.: Химия, 1990. – 255 с.
177. Голецян, М.Н. Исследование и разработка способа автоматизированной сборки клеевых цилиндрических соединений: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Голецян Мартин Норайрович. – Москва, 1992. – 188 с.
178. Демкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
179. Фролов, М.И. Техническая механика: детали машин / М.И. Фролов. – 2-е изд., доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 352 с.
180. Романов, М.Я. Сборник задач по деталям машин / М.Я. Романов, В.А. Константинов, Н.А. Покровский. – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.
181. Детали машин: учебник для вузов / Л.А. Андриенко, Б.А. Байков, И.К. Ганулич [и др.]. – 2-е изд., перераб. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 520 с.
182. Рабинович, Е.З. Гидравлика: учебник для техникумов / Е.З. Рабинович, А.Е. Евгеньев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 224 с.
183. Игнатов, А.В. Типовые системы автоматизированного дозирования однокомпонентных термореактивных клеевых составов для сборочных производств с клеевыми соединениями / А.В. Игнатов, В.С. Безменов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2013. – № 6. – С. 3–14.
184. Ханин, М.В. Исследование течения потока газа около шероховатой поверхности / М.В. Ханин // Прикладная механика и техническая физика. – 1966. – № 6. – С. 88–93.
185. Ворожцов, О.В. Гидравлика с примерами решения задач: учеб. пособие / О.В. Ворожцов. – Изд-во ПсковГУ, 2014. – 144 с.

186. Вакина, В.В. Машиностроительная гидравлика. Примеры расчетов / В.В. Вакина, И.Д. Денисенко, А.Л. Столяров. – Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 208 с.

187. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

188. Гладких, С.Н. Новые клеи разработки ОАО «Композит» для изделий ракетно-космической техники / С.Н. Гладких, А.Э. Дворецкий, А.И. Вялов // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2016. – № 2. – С. 50–56.

189. Игнатов, А.В. Новые тенденции развития сборки клеевых соединений в машиностроении / А.В. Игнатов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. Технология и технологические машины. – 2011. – № 10. – С. 62–68.

190. Пат. 2703643 Российская Федерация, МПК В05В 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.

191. Petrovsky, E.A. Study of pyrolysis of oil sludge / E.A. Petrovsky, O.A. Kolenchukov, E.A. Solovyev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 537. – 5 p.

192. Ершов, А.И. Основы научных исследований и инновационной деятельности: учеб. Пособие: в 2 ч. Ч. 2 / А.И. Ершов. – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2012. – 104 с.

193. Проскуряков, Ю.Г. Чистовая обработка давлением / Ю.Г. Проскуряков. – Справочная книга по отделочным операциям в машиностроении. – Л.: Ленинздат, 1966. – 544 с.

194. Корнеев, А.А. Исследование влияния шероховатости поверхности на прочность соединения, полученного с применением металлополимерных композиционных материалов / А.А. Корнеев, А.С. Любимова, Н.В. Шилов //

Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2012. – № 1. – 54–56.

195. Вартанов, М.В. Обеспечение технологичности конструкции изделий при их многоуровневом преобразовании в структуру процесса автоматизированной сборки: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08; 05.13.06 / Михаил Владимирович Вартанов. – Москва, 2005, 554 с.

196. Рот, А. Вакуумные уплотнения: пер. с англ. / А. Рот. – М.: Энергия, 1971. – 464 с.

197. Комаров, Г.В. Способы соединения деталей из пластических масс / Г.В. Комаров. – М.: Химия, 1979. – 288 с.

198. Чеканов, А.Н. Расчеты и обеспечение надежности электронной аппаратуры: учеб. пособие / А.Н. Чеканов. – М.: КноРус, 2016. – 440 с.

199. 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: науч.-тех. жур. – 2021. – № 4. – 16–20.

200. Пат. 2789519 Российская Федерация, МПК В01J 8/00, В28В 3/00, С01В 3/00, С01В 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.

201. Intensification of heat transfer by mixing in pyrolysis units during oil waste disposal / O.A. Kolenchukov, E.A. Petrovsky, A.Yu. Mikhaylov, K.A. Bashmur, N.A. Smirnov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862. – 7 p.

Приложение



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ТЕХНОЛОГИЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО
ОБОГАЩЕНИЯ И СОРТИРОВКИ «ТЕХНОРОС»

660028, Красноярский край, город Красноярск, Телевизорная ул., д.1, стр. 7, помещ. 1,

тел. (391) 232-00-77, E-mail: technoros@kras.ru, <http://www.technoros-kras.ru/>

ИНН: 8800004432/ КПП 246301001, ОГРН 1028800004870

«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор ООО «Технорос»
И.И. Кацер
_____ 2023 г.



производственных испытаний реакторного агрегата с рельефной обечайкой

Мы, нижеподписавшиеся, технический директор ООО «Технорос» Ефимов А.В., главный инженер ООО «Технорос» Савенков И.Ю., составили настоящий акт о том, что на нашем предприятии были проведены испытания реакторного агрегата с рельефной обечайкой, разработанного в Красноярском институте Нефти и газа Сибирского федерального университета старшим преподавателем Коленчуковым О.А. и профессором, д.т.н. Петровским Э.А., предназначенного для переработки углеводородных отходов с целью получения полезных продуктов.

В результате производственных испытаний были получены следующие результаты:

1. Установлена работоспособность реактора с рельефной термоконтактной поверхностью в диапазоне температур от 500 до 700 °С.

2. Выявлено влияние геометрических параметров полусферических выступов на производительность реактора. В процессе испытаний регулировались следующие параметры: высота выступов – 1–4 мм, шаг вдоль образующей – 6,67–20 мм, шаг вдоль направляющей – 5,7–16,2 мм. Приrost средней температуры в реакционной камере реактора в зависимости от высоты выступов по сравнению с обычным реактором составляет в среднем 6 %.

3. Установлена возможность регулирования геометрических характеристик на пластинах из стали 12X18H10T при формообразовании на подложке на продольно-фрезерном станке 6610 в диапазоне режимов: усилие (Р) 500–1500 Н, скорость подачи стола (V) 1000–2000 мм/мин.

4. Определена необходимость модернизации приспособления для установки металлических листов с целью повышения точности и обеспечения геометрической формы рельефа термоконтактной поверхности.

В процессе проведения испытаний также установлено, что метод формирования замка на металлическом листе, повторяющим форму корпуса реактора с рельефной термоконтактной поверхностью малой толщины, является неудобным в эксплуатации и требует дальнейшей доработки. Тем не менее конструкция реакторного агрегата с рельефной обечайкой является работоспособной, обладает хорошими эксплуатационными характеристиками и рекомендуется для внедрения.

Технический директор
ООО «Технорос»



А.В. Ефимов

Ведущий инженер
ООО «Технорос»



И.Ю. Савенков



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«СПЕЦИАЛЬНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО
«МЕХАНИКА»

660028, Красноярский край, город Красноярск, уд. Ладо Кецховели., д.75, кв. 120,
тел. (913) 831-71-48, факс. (391)2438817, E-mail: sdb_m@bk.ru
ИНН: 2463226383/ КПП 246301001, ОГРН 1112468008278

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор ООО «СКБ
«Механика»

А.К. Данилов

« » 2023 г.



Акт

**о внедрении результатов диссертационного исследования О.А. Коленчукова
на тему «Повышение производительности реакторных агрегатов на основе
модифицирования термоконтактных поверхностей»**

Настоящий акт составлен комиссией ООО «СКБ «Механика» в составе исполнительного директора Привалихина Р.С. и инженера-технолога Михайлова А.Ю. об использовании результатов диссертационного исследования Коленчукова О.А. в производственном процессе предприятия. Среди основных внедряемых технических и технологических решений можно выделить следующие:

1. Способ и устройство для формирования термоконтактной поверхности на листовом металле.
2. Технология изготовления двухэлементного корпуса реакторного агрегата в виде комбинированного теплообменного элемента с помощью клеевых композиций.
3. Технологии нанесения клеевых композиций и технологии изготовления замка термоконтактной поверхности комбинированного теплообменного элемента.

Внедрение полученных результатов исследований позволило сократить время изготовления термоконтактных поверхностей, снизить затраты при производстве и обслуживании технологического оборудования.

Исполнительный директор
ООО «СКБ «Механика»

Р.С. Привалихин

Инженер-технолог
ООО «СКБ «Механика»

А.Ю. Михайлов