

На правах рукописи



РАХМАТУЛЛИН ИЛЬДАР РАМИЛЕВИЧ

МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ЗАМЕДЛЕННОГО КОКСОВАНИЯ

2.6.12. – Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа-2026

Работа выполнена на кафедре «Технология нефти и газа» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Ахметов Арслан Фаритович

Официальные оппоненты: **Капустин Владимир Михайлович**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Российский государственный
университет нефти и газа (национальный
исследовательский университет) имени И.М.
Губкина», заведующий кафедрой
«Технология переработки нефти»

Сладковский Дмитрий Андреевич
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный технологический институт
(технический университет)», заведующий
кафедрой ресурсосберегающих технологий

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Казанский (Приволжский)
федеральный университет»

Защита диссертационной работы состоится «30» сентября 2026 г. в 14:00
на заседании диссертационного совета 24.2.428.02 при ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный нефтяной технический университет» по адресу:

450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО
«Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте
www.rusoil.net.

Автореферат разослан _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бадикова Альбина Дарисовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В соответствии с Энергетической стратегией Российской Федерации ключевым целевым показателем развития нефтеперерабатывающей отрасли к 2030 году является достижение глубины переработки нефти на уровне 90,0 %. Реализация данной стратегической задачи сопряжена с комплексом вызовов. Среди них можно выделить структурное утяжеление сырьевой базы, выражающееся в постоянном росте доли трудноизвлекаемых тяжёлых, высоковязких и высокосернистых нефтей, а также ограничения технологического характера, обусловленные современными внешнеполитическими реалиями.

В связи с этим обеспечение технологического суверенитета и создание конкурентоспособных отечественных решений для глубокой переработки нефти становится критически важным. Данный приоритет нашел отражение в перечне критических технологий, оборудования и материалов, производство которых подлежит первоочередной локализации на территории Российской Федерации до 2050 года. В указанный перечень входят процессы глубокой и вторичной переработки, в частности: гидрокрекинг вакуумного газойля и остатков, каталитический крекинг, замедленное коксование, гидроконверсия остатков, изодепарафинизация, каталитический риформинг с движущимся слоем катализатора, а также производство соответствующих катализаторов и оборудования.

Особое место в этом ряду занимает процесс замедленного коксования как один из наиболее эффективных и широко применяемых методов конверсии тяжёлых нефтяных остатков. Однако его потенциал в контексте решения стратегической задачи сдерживается как наличием практических инженерно-технических проблем, связанных с надёжностью и эффективностью работы ключевого аппарата – коксовой камеры, так и современных санкционных

ограничений, приводящих к острой необходимости в импортонезависимых инженерных решениях.

Несмотря на широкий ряд представленных лицензиаров технологии замедленного коксования (в частности, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Foster Wheeler, UOP LLC, АО «Институт нефтехимпереработки», ABB Lummus Global Inc и Bechtel Hydrocarbon Technology Solutions), реакционные аппараты подвержены общим дефектам и проблемам, которые связаны:

1) с температурными напряжениями, вызванными неравномерностью прогрева из-за конструкционных особенностей узла ввода сырья;

2) с рисками образования гофр и деформаций по сварным соединениям и основному металлу из-за высоких скоростей охлаждения коксовых камер, достигающих более 200 °С/ч;

3) с неравномерным качеством коксового пирога при боковом и двустороннем вводах сырья;

4) с наличием эффекта «банана» (искривления корпуса) в период процедуры охлаждения коксовых камер;

5) с ненадёжностью существующих конструкций устройств центрального ввода сырья;

6) с неконтролируемым режимом заполнения аппарата.

Активные исследования в области модернизации реакторного блока установок замедленного коксования проводились в основном в 1970 – 1990 гг. на базе коксовых камер диаметром 5,0–5,5 м. Последние монографии по этой тематике были опубликованы в 2009 – 2010 гг. За последние 16 лет на территории Российской Федерации были построены новые мощности, оснащённые реакционными аппаратами большего диаметра ($\geq 7,0$ м). Таким образом, существует научно-технический пробел, на устранение которого направлена настоящая работа, заключающийся в отсутствии validated (проверенных) моделей температурных полей и конструктивных решений,

необходимых для минимизации термических напряжений в процессе коксования.

Степень разработанности темы

В области модернизации установок замедленного коксования широко известны работы И.Р. Кузеева, Е.А. Филимонова, Ю.М. Абызгильдина, В.М. Кренинина, Н.Т. Походенко, Б.И. Брондз, В.И. Егорова, представленные в тематических обзорах и монографиях. Однако эти исследования требуют актуализации с учётом новых технических решений зарубежных лицензиаров и актуального опыта эксплуатации коксовых камер за период 2010 – 2026 гг.

В области прогнозирования выхода нефтяного кокса и его структуры широко известны труды В.П. Запорина, М.Ю. Доломатова, С.В. Сухова, Г.Г. Валявина, К.Г. Валявина, А.Ф. Красюкова, З.И. Сюняева, Е.В. Смидович, Б.К. Америк, Я.А. Ботникова, Р.Н. Гимаева, М.Х. Левинтера, Р.З. Магарила, С.А. Ахметова, Р. Франклина, В.И. Касаточкина, А.С. Фиалко. Также существуют разработанные зависимости Гери и Хэндверка, Мейплза, Шаброна и Спайта, Кастильони и др.

Данные научные исследования имеют фундаментальный характер, и при их применении к расчётам для действующих промышленных установок наблюдается определённая погрешность. Кроме того, во многих научных трудах представлены результаты анализа кокса с низким содержанием летучих веществ (8–12 % масс.), тогда как в современных условиях для решения проблем сбыта высокосернистого кокса необходимо производить кокс с высоким содержанием летучих (15–25 % масс.).

В рамках данной научной работы предпринята попытка разработать математические модели для прогнозирования качества (в первую очередь, выхода и содержания летучих веществ) нефтяного кокса для промышленной установки замедленного коксования.

Соответствие паспорту научной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 2.6.12. – «Химическая технология топлива и

высокоэнергетических веществ», пункту 12. «Моделирование и оптимизация химико-технологических процессов на основе цифрового прогнозирования, математических методов, системного анализа и информационных технологий применительно к производствам».

Цель и задачи исследования

Целью работы является проведение комплексного моделирования конструкций коксовых камер для оптимизации процесса формирования качества нефтяного кокса действующего производства замедленного коксования.

Для достижения поставленной цели решались **задачи**:

1. Провести анализ современного состояния российских и зарубежных исследований в области конструкционного оформления коксовых камер, технологии замедленного коксования.

2. Провести инженерно-математическое моделирование конструктивных вариантов коксовых камер (различные материалы, сварные соединения, узлы ввода сырья) с целью оценки температурных полей и напряжённо-деформированного состояния, а также выполнить сопоставление результатов моделирования с промышленными данными.

3. Разработать технические рекомендации по конструкционному оформлению коксовых камер в условиях санкционных рисков.

4. Выполнить многофакторный статистический анализ влияния параметров установки замедленного коксования на содержание летучих веществ в коксе.

5. Проверить точность и адекватность разработанной модели прогноза содержания летучих веществ в нефтяном коксе по промышленным данным.

Научная новизна

1. Впервые проведен факторный анализ влияния рабочих параметров действующей установки замедленного коксования на содержание летучих веществ нефтяного кокса (15-25 % масс.) методами многомерного статистического анализа.

2. Впервые разработано математическая модель прогноза качества высоколетучего нефтяного кокса с содержанием летучих веществ (15-25 % масс.) с применением методов многомерного статистического анализа.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость исследований заключается в установлении многофакторной регрессионной зависимости, связывающей содержание летучих веществ в нефтяном коксе с качественными характеристиками сырья (содержание крекинг-остатка установки висбрекинг, асфальта с установок деасфальтизации и гудрона АВТ в % масс., коксуетость сырья в % масс., содержание общей серы в % масс., плотность при 20 °С в кг/м³, температура размягчения методом кольца и шара в °С) и режимными технологическими параметрами промышленной установки замедленного коксования (расход первичного сырья в кг/ч, расход крекинг-остатка установки висбрекинг в кг/ч, температура вторичного сырья после печи в °С, температура нагрева камеры до коксования в °С, температура на входе в камеру в °С, давление на входе в камеру в кгс/см², температура паров верха камеры в °С, давление паров верха камеры в кгс/см², температура паров от камеры в К-101 в °С, температура паров от камеры в К-104 в °С, расход водяного пара при пропарке в К-101 в кг/ч, расход водяного пара при пропарке в К-104, кг/ч). Адекватность зависимости подтверждается статистическим параметром RMSEP_TEST (среднеквадратичная ошибка оценки на тестовой выборке), который не превышает 2,8 % масс., что является допустимым значением при выработке высоколетучего нефтяного кокса (15-25 %).

Практическая значимость заключается в следующем:

1. Разработана эффективная конструкция коксовой камеры, позволяющая увеличить срок службы и надежность реакторного блока установок замедленного коксования.

2. Разработан метод прогноза качества нефтяного кокса и подбора оптимального технологического режима с учетом качества исходного сырья,

позволяющий повысить маржинальность действующей установки замедленного коксования.

Методология и методы исследований

Решение поставленных задач по моделированию реакционных аппаратов осуществлялось с применением методов вычислительной гидродинамики (CFD) в специализированном программном комплексе Ansys FLUENT. Для разработки моделей коксовых камер были использованы две основные математические модели: k-epsilon и k-omega, относящиеся к классу RANS-моделей (осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса) и решающие дополнительные уравнения для расчёта турбулентной вязкости.

Для многомерного статистического анализа влияния параметров установки замедленного коксования на содержание летучих веществ в коксе и разработки прогнозной модели были выгружены многолетние промышленные данные за 2017–2023 гг., сформирована сводная таблица по 4 коксовым камерам и применены методы главных компонент (PCA – Principal Component Analysis) и проекции на латентные переменные (PLS – Partial Least Squares).

Определение физико-химических свойств сырья (плотность при 20 °С, г/см³; температура размягчения по кольцу и шару, °С; коксуемость по Конрадсону, % масс.; содержание серы, % масс.) и полученных продуктов (содержание летучих веществ, % масс.) проводилось с использованием стандартных лабораторных методов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования по модернизации установок замедленного коксования, которая характеризуется изменением конструкции ввода сырья с целью стабилизации качества коксового пирога по сечению и высоте аппарата.

2. Результаты исследования влияния качества сырья и технологического режима установки замедленного коксования на содержание летучих веществ в нефтяном коксе.

3. Разработка алгоритма по подбору технологического режима для производства нефтяного кокса требуемого качества в зависимости от качества поступающего сырья.

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается использованием апробированных методик инженерного анализа, современных программных комплексов для моделирования тепловых и напряжённо-деформированных состояний коксовых камер, а также корректной обработкой многолетних эксплуатационных данных установок замедленного коксования.

Достоверность математико-статистических моделей подтверждена воспроизводимостью результатов, согласованием расчётных и фактических показаний температурных полей, сопоставлением с промышленными данными за 2017–2023 гг., а также непротиворечивостью полученных выводов литературным источникам и промышленной практики.

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на кустовых, региональных и межрегиональных конференциях молодых специалистов ПАО «НК «Роснефть», по итогам которых работы были удостоены дипломами I и II степеней, соответственно, в секциях «Повышения эффективности работы оборудования» и «Лабораторные и научные исследования». По итогам межрегиональной конференции в г. Москва проект «Разработка метода прогноза качества нефтяного кокса» был рекомендован к реализации на заводах Филиалов ПАО АНК «Башнефть» «Башнефть-Новыйл» и «Башнефть-Уфанефтехим».

Материалы были представлены на международных научных конференциях: XV Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и техники» (Уфа, 2022), IV Международная научно-техническая интернет-конференция «Защита окружающей среды от экотоксикантов: Международный опыт и российская практика» (Уфа, 2022), Международная научно-практическая конференция имени Д.И. Менделеева,

посвященной 15-летию института промышленных технологий и инжиниринга (Тюмень, 2024).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках договора №435ГУЦЭС8-В3/62073 от 5 октября 2020 г. для реализации проекта по программе «УМНИК-Цифровой Нефтегаз» по теме «Разработка системы мониторинга за техническим состоянием коксовых камер установок замедленного коксования».

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 9 научных трудах, в том числе 5 статей, рекомендованных ВАК, из которых 2 индексируются базами данных Scopus и Web of Science, 2 работы в материалах научных конференций, 2 свидетельства о государственной регистрации программы ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 179 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы из 190 наименований и включает 24 таблицы, 92 рисунка.

Личный вклад автора

Автор занимался данной научной работой в период с 2018 по 2026 гг. Им лично были выполнены:

- обобщение и обработка исходных данных для построения геометрических моделей коксовых камер Уфимской группы НПЗ;
- гидродинамическое CFD-моделирование коксовых камер, отличающихся геометрическими размерами, конструкциями узлов ввода сырья, сварных соединений и опор, с применением методов вычислительной гидродинамики в программном комплексе Ansys FLUENT;
- выгрузка и подготовка статистических промышленных данных по работе установки замедленного коксования за 2017 – 2023 гг.;
- многофакторный статистический анализ промышленных данных методами главных компонент (PCA) и проекции на латентные переменные (PLS).

Автор выражает признательность научному руководителю, д.т.н., профессору Ахметову Арслану Фаритовичу, сотрудникам кафедры «Технология нефти и газа» и ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в лице Запорина Виктора Павловича, Сухова Сергея Витальевича, Рахимова Марата Наврузовича, Гайсиной Айгуль Ралифовны, Ганцева Александра Викторовича, Абдульминева Кима Гимадиевича, Гильмутдинова Амира Тимерьяновича за содействие, помощь и поддержку в научной деятельности, а также за участие в обсуждении полученных результатов.

Отдельная благодарность выражается коллегам из топливно-энергетического комплекса: Галиакбирову Артуру Рафисовичу, Талипову Динару Фанисовичу, Каримову Ильдару Вильевичу, Праскину Алексею Борисовичу, Камалову Рустему Мирхадовичу, Абдуллину Азату Ахьямовичу и Сиденеву Дмитрию Михайловичу, а также многим другим специалистам за предоставленный промышленный опыт работы на действующей установке замедленного коксования и за технико-экономический анализ ее работы, использованный в данном исследовании.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы основные цели и задачи диссертационного исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена обзору российских и зарубежных литературных источников по теме диссертации в области замедленного коксования тяжелых нефтяных остатков.

Приведен подробный литературный обзор, в котором рассмотрены технологии коксования: периодическое коксование в кубах, замедленное коксование и коксование в псевдоожиженном слое (процессы флюидкокинг и флексикокинг). Отмечены преимущества процесса замедленного коксования по сравнению с остальными.

Проанализировано развитие процесса замедленного коксования за рубежом на основе опыта работы лидирующих лицензиаров ABB Lummus Global Inc., ConocoPhillips/Bechtel Hydrocarbon Technology Solutions, Foster Wheeler, внесших значительный вклад в развитие теплообменного и реакционного оборудования, а также технологических схем УЗК.

Рассмотрено становление отечественного процесса замедленного коксования, состоящего из этапов бурного развития (1956–1986 гг.), стагнации

(1990-е – 2000-е гг.) и возрождения интереса к проектированию новых и реконструкции существующих УЗК (2000-е годы по настоящее время).

Проведен сравнительный анализ зарубежных и отечественных промышленных установок замедленного коксования. Выявлены ключевые недостатки отечественных УЗК, связанные с малым сроком службы коксовых камер и, как следствие, низкой надежностью реакторного блока.

Выявлены отличия конструкций зарубежных и отечественных коксовых камер, заключающиеся в применении меньшей толщины стенок и массы аппарата, расчете на более жесткие условия эксплуатации, а также в использовании аксиального ввода сырья.

Рассмотрены способы оптимизации цикла коксования за счет монтажа автоматических шиберных задвижек. Отмечено, что коксовые камеры, оснащенные данным типом запорно-регулирующей арматуры и имеющие цикл коксования менее 36 часов, обладают наивысшим показателем коксосодема.

Отмечена необходимость проведения модернизации реакторного блока отечественных установок замедленного коксования.

Во второй главе обоснован выбор объектов исследования, описаны методы и методики исследования.

В качестве объектов исследования выбраны реакционные аппараты (коксовые камеры) отечественных установок замедленного коксования, которые различаются по следующим признакам:

- материальному исполнению (нержавеющая сталь и биметалл);
- конструкции опорных соединений;
- геометрическим размерам;
- углу наклона сырьевого патрубка.

Для численного моделирования и исследования рабочих процессов в коксовых камерах были использованы фундаментальные методы, реализованные в стандартных моделях турбулентности ($k-\epsilon$ и $k-\omega$) программного комплекса инженерного анализа ANSYS Fluent.

Для обработки статистических данных промышленной эксплуатации установок замедленного коксования применялись методы многомерного статистического анализа, включая основы анализа главных компонент (РСА) и проекции на латентные структуры (PLS-анализа).

В третьей главе проведено моделирование и модернизация коксовых камер с изменениями способа организации ввода сырья и конструкции опор в программе конечного инженерного анализа ANSYS Fluent. Определено, что все виды дефектов в той или иной мере определены появлением значительных температурных напряжений. Приведены характеристики исходного сырья и сводный материальный баланс рассматриваемой установки замедленного коксования.

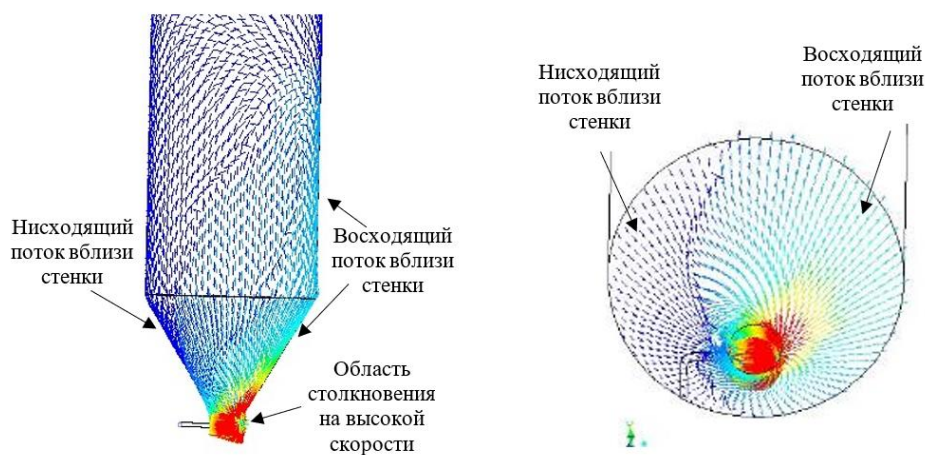
На основании статистики отбора проб анализа смесового сырья установки замедленного коксования за 2017 – 2023 гг., наличия библиотек по набору свойств углеводородов и материального исполнения в программе Ansys унифицированы основные показатели рабочей среды и проведен их учет при моделировании реакционных аппаратов с целью последующей модернизации установки.

Для рассматриваемых коксовых камер проведена модернизация с изменением способа организации подачи сырья: боковой односторонний, двухсторонний, классический центральный (аксиальный) и с применением системы центрального ввода сырья.

При боковом вводе сырьевой поток ударяется о стенку, противоположную штуцеру подачи. Это приводит к локальному перегреву и неравномерному распределению температурного поля стенки аппарата, что, в свою очередь, вызывает неоднородность формирования коксового пирога. В результате последующее охлаждение камеры также происходит неравномерно. Именно этап охлаждения является критическим фактором, определяющим фактический ресурс (срок службы) реактора. Неравномерность распределения (Рисунок 1) и характер изменения температуры в оболочке реактора коксования является наиболее важным

фактором, определяющим весь процесс накопления повреждений.

Перед проведением тепловых расчетов конструкций коксовых камер проведен анализ сходимости значений, выдаваемых моделью, с фактическими показаниями термопар (Рисунок 2).



а – вид спереди; б – вид сверху

Рисунок 1 – Распределение сырьевого потока в коксовой камере при боковом одностороннем вводе сырья

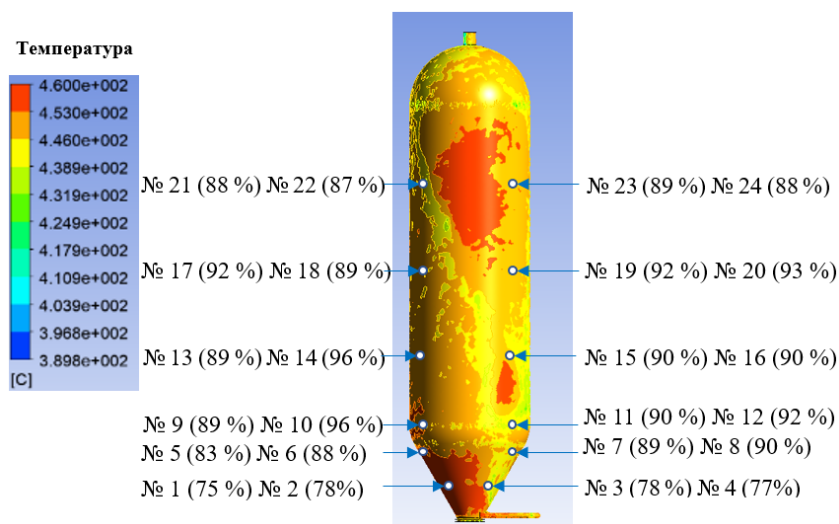


Рисунок 2 – Расположение поверхностных термопар на коксовой камере и значение сходимости расчета (в скобках)

Коэффициент сходимости расчетных и фактических показаний температур стенок составил от 75 до 97%. В конусной части при этом зафиксировано наименьшая точность. Причиной этому является нарастание коксовой массы, обладающей низким коэффициентом теплопроводности.

Анализ векторов скоростей при организации двустороннего ввода сырья показывает, что, хотя геометрическое расположение впускных отверстий симметрично, поток внутри коксовой камеры несимметричен. Встречные сырьевые потоки создают нестабильность, которая приводит к смещению потока в одну сторону. Наблюдается восходящий поток у стенок коксовой камеры. Смещение потока и восходящий поток у стенок могут привести к локализованным горячим точкам и/или образованию каналов.

Сравнительный анализ температурного профиля выявил, что и для бокового одностороннего бокового ввода, и для двухстороннего характер температурного поля поверхности стенок коксовой камер идентичен. Наблюдается неравномерный по высоте и периметру прогрев реактора, что приводит к нестабильности камеры, ее наклону и скручиванию (эффект банана) и неравномерному формированию коксового пирога (закапсулированные зоны). Для двух рассмотренных вариантов имеются зоны с температурой 490 °С, 450 °С, перепады достигают 40 °С.

Многочисленные исследования зарубежных ученых подтверждают, что классический центральный (аксиальный) ввод сырья является самым эффективным из ныне существующих, но характер изменения векторов скоростей в верхней части коксовой камеры отличается от нижней. Спустя 40 секунд после подачи сырья в верхней части коксовой камеры наблюдается изменение направления сырьевого потока – он стремится вниз. При данных условиях неравномерность нагрева коксовой камеры будет присутствовать. При этом существенным недостатком конструкции является невозможность монтажа автоматической шиберной задвижки.

Устройство центрального ввода признана лучшей практикой современных УЗК, т.к. она позволяет организовать аксиальную подачу сырья и монтаж автоматической шиберной задвижки. Но при этом она не лишена недостатков: сложная техническая конструкция сопла приводит к большим потерям на местных сопротивлениях, что приводит к снижению давления расхода сырья на 13 % от традиционного центрального ввода сырья. Имеется

высокая вероятность отказа приводной системы при заполненной коксовой камеры, отсутствуют специалисты для проведения экспертизы технического состояния данной системы и не исключены санкционные риски недопоставки устройства на отечественные УЗК.

Для решения проблемы повышения эффективности технологического процесса ЗК стоит привести другие способы организации ввода сырья в коксовую камеру, которые не внедрены в промышленном масштабе.

Многие ученые в области замедленного коксования предлагают для обеспечения равномерного распределения коксового пирога, а также температурного поля, монтировать сырьевые патрубки по касательной к днищу коксовой камеры. На Рисунке 3 представлено расположение штуцеров сырьевых трубопроводов, расположенных по касательной.

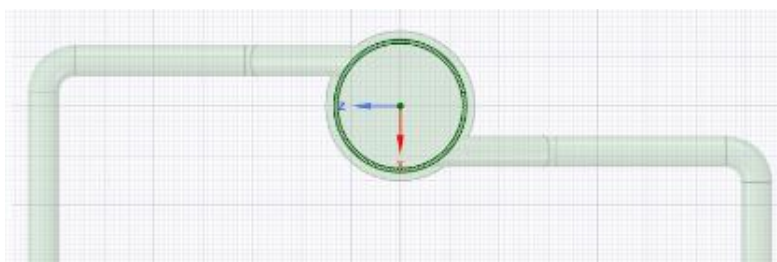


Рисунок 3 – Штуцеры сырьевых трубопроводов, расположенных по касательной

Расчеты гидродинамики данной конструкции показывают ее преимущества: интенсивное перемешивание сырьевых потоков, меньший перепад температур на стенках реактора (20°C), согласно тепловому расчету.

Двусторонний ввод с расширяющимся патрубком и отклонением вдоль оси также не имеет в настоящее время промышленного использования. Данный ввод предложен учеными «Уфимского государственного нефтяного технического университета». На Рисунке 4 представлена геометрия конструкции коксовой камеры с двусторонним вводом сырья (с расширяющимся патрубком и отклонением вдоль оси).

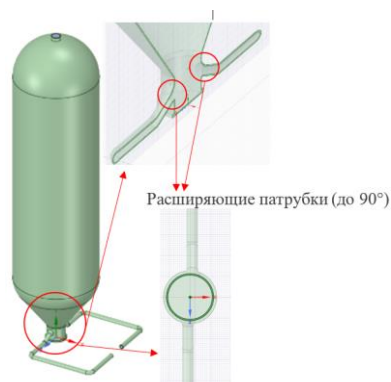


Рисунок 4 – Геометрия конструкции коксовой камеры с двусторонним вводом сырья (с расширяющимся патрубком и отклонением вдоль оси)

Как отмечалось ранее, наибольшее напряжение при заполнении коксовой камеры возникает в нижней части удара сырьевого потока при боковом одностороннем и двухстороннем вводе сырья. При эксплуатации аксиального ввода (традиционный центральный или устройства центрального ввода сырья) в верхней части коксовой камеры происходит отклонение вертикального потока от оси, что может привести к контакту горячего потока со стенкой цилиндрической обечайки.

Соответственно, необходимо в нижней части организовать интенсивную турбулизацию сырьевого потока, уменьшив скорость до такой степени, чтобы в конусной части заполнение коксовой камеры происходило равномерно вверх.

На Рисунке 5 представлена геометрия предлагаемого ввода сырья со сферообразной нижней частью для турбулизации потока.

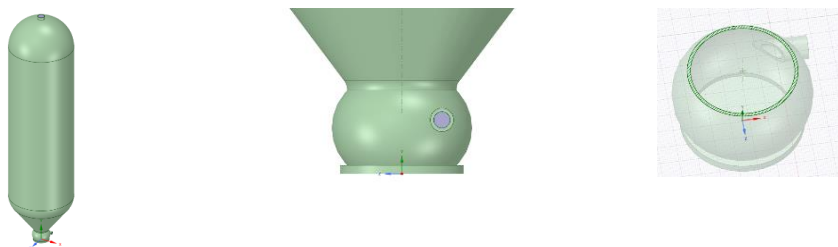


Рисунок 5 – Геометрия предлагаемого ввода сырья со сферообразной нижней частью для турбулизации потока

В четвертой главе была разработана математическая модель прогноза содержания летучих веществ в нефтяном коксе.

На практике на установках замедленного коксования производят нефтяной кокс марки С или коксующую добавку с содержанием летучих от 15 до 25 %, если вырабатывается кокс ниже данного значения, то потребители недовольны, если выше – выход светлых в материальном балансе НПЗ снижается (Рисунок 6). Поэтому очень важно не уходить за пределы этих значений.



Рисунок 6 – Статистика по выработке кокса на УЗК УНХ за 2018-2020 гг.

Особенностью УЗК является высокая инерционность, характеризующаяся тем, что результат влияния исходных параметров на качество конечной продукции можно проанализировать только через 1,5 суток. Поэтому не удастся на основании прошлого цикла отрегулировать последующий, потому что качественные показатели исходного сырья постоянно меняются. Многочисленные обследования и статистическая обработка результатов анализа качества кокса по высоте реактора показали, что содержание летучих веществ в коксе по высоте реактора меняются в широких пределах.

Средний выход летучих из кокса с установки замедленного коксования зависит также от температурных условий в реакторе, длительности заполнения

реактора коксом и условий охлаждения (длительности пропарки) полученного кокса.

Для разработки моделей прогноза качества нефтяного кокса был определен период выгружаемых данных: 01.01.2017 – 01.07.2023.

Дискретность исходных данных определена в 10 минут.

Параметрами работы УЗК для статистического анализа послужили:

- прогнозируемый параметр: содержание летучих в коксе в % масс.;
- данные для кластеризации: позиция реактора, загрузка установки в %, длительность цикла коксования в часах, содержание крекинг-остатка установки висбрекинг, марки выпускаемого кокса и пределы летучих веществ;
- характеристика сырья: содержание крекинг-остатка установки висбрекинг в % масс., коксуемость сырья в % масс., содержание общей серы в % масс., плотность при 20 °С в кг/м³, температура размягчения методом кольца и шара в °С;
- технологические параметры установки: расход первичного сырья в Т-101...Т-105 в кг-ч, расход крекинг-остатка установки висбрекинг в кг/ч, температура вторичного сырья после печи в °С, температура нагрева камеры до коксования в °С, температура на входе в камеру в °С, давление на входе в камеру в кгс/см², температура паров верха камеры в °С, давление паров верха камеры в кгс/см², температура паров от камеры в К-101 в °С, температура паров от камеры в К-104 в °С, расход водяного пара при пропарке в К-101 в кг/ч, расход водяного пара при пропарке в К-104, кг/ч;
- содержание компонентов сырья замедленного коксования: крекинг-остатка установки висбрекинг, асфальта с установок деасфальтизации и гудрона АВТ.

Этапы формирования таблицы данных:

- выгрузка результатов отбора проб качества нефтяного кокса;
- оценка содержания компонентов сырья замедленного коксования: крекинг-остатка установки висбрекинг, асфальта с установок деасфальтизации и гудрона АВТ;

- выгрузка лабораторных анализов сырья замедленного коксования и рабочих параметров производства;
- объединения всех данных в общую сводную таблицу.

Согласно статистике за 2017–2023 гг., установка замедленного коксования производила нефтяной кокс трёх марок:

- кокс марки Б с содержанием летучих веществ 8–12 % масс. (193 пробы, 3 % от общего числа анализов);
- кокс марки С с содержанием летучих веществ 15–25 % масс. (4574 пробы, 75 % от общего числа анализов);
- коксующую добавку с содержанием летучих веществ 15–25 % масс. (1355 проб, 22 % от общего числа анализов).

Для кластеризации исходных данных по маркам продукции были применены методы PCA (метод главных компонент) и PLS (проекция на латентные структуры), а также проекция точек на главные компоненты.

Поскольку нефтяной кокс марки Б производился установкой только в период с июля по сентябрь 2017 года, а случаи выработки некачественного кокса наблюдаются лишь для высоколетучих марок, данные по производству кокса с содержанием летучих веществ 8–12 % масс. были исключены из дальнейшего анализа.

Установка замедленного коксования может работать в трёх режимах нагрузки по первичному сырью: 1) 100 % нагрузка (расход ~183 т/ч) — стабильная работа по четырёхреакторной схеме; 2) 75 % нагрузка (расход ~137 т/ч) — работа в период оперативного парового декоксования; 3) 50 % нагрузка (расход ~91 т/ч) — работа по двухреакторной схеме.

Для последующего статистического анализа периоды работы на 50 % и 75 % нагрузке были также исключены.

В исходную таблицу данных были включены параметры: расход воды на охлаждение коксовых камер, коэффициент рециркуляции, расход тяжелого газойля коксования в колонну подготовки вторичного сырья и содержание серы в первичном сырье и ряд других параметров, которые не оказывают

статистически значимого влияния на целевой показатель. Следовательно, проведено их исключение из дальнейшего анализа. Было проведена разработка моделей прогноза качества нефтяного кокса индивидуально под каждую коксовую камеру (Всего 4 аппарата). Согласно Таблице 1 коэффициент детерминации R^2 имеет наиболее высокое значение в случае реактора R-104. Возможно, это связано с прибором учета температуры на входе в коксовую камеру, который наиболее точен для 4 аппарата, в отличии от первых трех. В последующем анализе была исключена статистика по работе реакторов P-101, P-102 и P-103.

Таблица 1 – Коэффициенты детерминации математических моделей прогноза содержания летучих веществ в нефтяном коксе для коксовых камер P-101, P-102, P-103, P-104

Позиция реактора	P-101	P-102	P-103	P-104
R^2	0,22	0,12	0,19	0,27

На основании анализа технологического процесса и результатов статистического анализа в итоговую модель были включены следующие параметры: содержание в сырье, % масс.: гудрона и тяжёлых нефтяных остатков (ТНО); асфальта; крекинг-остатка; давление паров из камеры, кгс/см². температура паров из камеры, °С; температура вторичного сырья на выходе из печи, °С. С точки зрения управления технологическим режимом данный набор параметров является оптимальным. Во-первых, содержание ключевых компонентов в сырье (гудрон, асфальт, крекинг-остаток) является определяющим фактором. Во-вторых, температура вторичного сырья регулируется подачей топливного газа в печь, что делает её управляемым параметром. В-третьих, такие показатели, как давление и температура паров из коксовой камеры, являются наблюдаемыми технологическими переменными, которые зависят как от состава сырья, так и от температурного режима в печи.

Для проверки прогнозируемой способности математической модели исходный массив статистических данных был разделен на два периода: 1)

обучающая выборка (87 % данных) – использована для расчета коэффициентов регрессионного уравнения и построения модели; 2) тестовая выборка (13 % данных) – использована для валидации модели и оценки её реальной прогнозной способности. Среднеквадратичная ошибка на тестовой выборке не превышает допустимых значений (2,8 % масс.) и при выработке высоколетучего нефтяного кокса (15-25 %) является приемлемой.

Была разработана математическая модель прогноза качества нефтяного кокса:

$$Y = 347,154491 + 0,0377152597244 \cdot a_1 - 0,0258727163293 \cdot a_2 - 0,0443111076913 \cdot a_3 - 0,267371000649 \cdot a_4 - 0,416789482324 \cdot a_5 - 8,57072954835 \cdot a_6,$$

где a_1 – содержание гудрона и ТНО в сырье коксования, % масс.;
 a_2 – содержание крекинг-остатка в сырье коксования, % масс.;
 a_3 – содержание асфальта в сырье коксования, % масс.;
 a_4 – температура паров из камеры коксования, °С;
 a_5 – температура вторичного сырья из печи коксования, °С;
 a_6 – давление паров из камеры коксования, кг/см².

Разработанную математическую модель можно реализовать в системе усовершенствованного управления технологическим процессом, где на основании качества исходного сырья (содержание компонентов коксования) и требуемого содержания летучих веществ в нефтяном коксе методом оптимизации будет подбираться рабочая температура на выходе из печи нагрева вторичного сырья.

Потенциальный экономический эффект при календарном фонде рабочего времени (8760 часов работы в году) и 32 часовом цикле коксования в годовом эквиваленте составил более 84,99 млн.руб. в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны геометрические модели коксовых камер действующих установок замедленного коксования в программе конечного инженерного анализа. На основании статистики температурного профиля распределения корпуса реакционных аппаратов доказана высокая сходимость расчетных и фактических показаний температуры стенок (75 - 97%). В конусной части при этом зафиксировано наименьшая точность. Причиной этому является нарастание коксовой массы, обладающей пониженной теплопроводностью.

2. С привлечением современного программного комплекса проведено моделирование разработанных конструктивных вариантов с изменением материального исполнения (биметалл, нержавеющая сталь), конфигурации сварных соединений (горизонтальные или вертикальные), опорной конструкции (опоры-лапы, опорное кольцо), а также схем организации подачи сырья (боковой односторонний, двусторонний, аксиальный и вариант с устройством центрального ввода сырья).

3. Разработаны технические рекомендации по конструкционному оформлению коксовых камер в условиях санкционных рисков. Предложена конструкция нижней части коксовой камеры, позволяющая обеспечить интенсивную турбулизацию сырьевого потока и равномерный нагрев конусной части аппарата.

4. Проведен анализ влияния технологических параметров на качество нефтяного кокса методом многомерного статистического анализа. Определены ключевые факторы, влияющие на содержание летучих в нефтяном коксе: содержание гудрона, крекинг-остатка и асфальта в сырье коксования; температура и давление паров из камеры коксования, температура вторичного сырья из печи коксования.

5. Для математической модели прогноза содержания летучих веществ в нефтяном коксе на базе тестовой выборки проведена проверка на точность и адекватность.

Основные работы, опубликованные по материалам диссертации:

Статьи, индексируемые в Web of science и Scopus:

1. Rakhmatullin I.R. Development of a Method for Predicting the Quality of Petroleum Coke / I.R. Rakhmatullin, D.M. Sidenev, A.F. Akhmetov, A.R. Gaysina // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2022. – Vol. 58. – P. 439 – 443.
2. Rakhmatullin I.R. Calculations for Coking Chamber Designs with Various Feedstock Charging Methods / I.R. Rakhmatullin, V.V. Sokolova // Chemical and Petroleum engineering. – 2021. – Vol. 56. – P. 699 – 704.

в журналах из перечня ВАК:

3. Рахматуллин И.Р. Разработка эффективного способа организации ввода сырья в коксовую камеру / И.Р. Рахматуллин, А.Ф. Ахметов // Нефтепереработка и нефтехимия. 2026. № 5. С. 10-17.
4. Рахматуллин И.Р. Анализ конструкции ввода сырья в коксовую камеру установки замедленного коксования / И.Р. Рахматуллин, Д.С. Брынов, В.В. Соколова // Технологии нефти и газа. – 2020. – № 5. – С. 55-59.
5. Рахматуллин И.Р. Анализ конструкции коксовых камер установки замедленного коксования / И.Р. Рахматуллин, В.В. Соколова // Технологии нефти и газа. – 2021. – № 5. – С. 42-47.

в материалах научных конференций:

6. Левашов Д.А. Разработка системы мониторинга работы существующих коксовых камер / Д.А. Левашов, И.Р. Рахматуллин // Актуальные проблемы науки и техники: материалы XV Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2022. – Т.1. – С. 144-146.
7. Кучкина В.О. Перспективы выработки игольчатого кокса на отечественных НПЗ / В.О. Кучкина, И.Р. Рахматуллин, Н.А. Савельев // Материалы Международной научно-практической конференции им. Д.И. Менделеева, посвященной 15-летию Института промышленных технологий и инжиниринга. – Тюмень: ТИУ, 2024. – Т.1. – С. 144-145.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022618106 Российская Федерация. Цифровая система мониторинга технического состояния коксовых камер установок замедленного коксования: № 2022616433: заявлено 05.04.2022: опубликовано 28.04.2022 / Рахматуллин И.Р., Сиденев Д.М., Левашов Д.А.; правообладатели Рахматуллин И.Р., Сиденев Д.М., Левашов Д.А. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617944 Российская Федерация. Программа по подбору оптимальных рабочих параметров для производства нефтяного кокса необходимого качества на установках замедленного коксования: № 2022616954: заявлено 11.04.2022: опубликовано 27.04.2022 / Рахматуллин И.Р., Сиденев Д.М., Левашов Д.А.; правообладатели Рахматуллин И.Р., Сиденев Д.М., Левашов Д.А. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.