

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования



**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Направление подготовки/профиль 18.06.01 – «Химическая технология» / 2.6.12 –
«Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ»

Инженерная школа природных ресурсов

Отделение Химической инженерии

**Научный доклад об основных результатах подготовленной
научно-квалификационной работы**

Тема научно-квалификационной работы
Повышение эффективности процесса пиролиза бензиновой фракции путем регулирования скорости образования кокса с использованием нестационарной математической модели

УДК 665.63.092-977

Аспирант

Группа	ФИО	Подпись	Дата
A9-51	Бунаев Аюр Алексеевич		

Руководителя профиля подготовки

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОХИ ИШПР	Чузлов В.А.	К.Т.Н.		

Руководитель отделения

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор ОХИ ИШПР	Короткова Е. И.	Д.Т.Н., профессор		

Научный руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
младший научный сотрудник ОХИ ИШПР	Долганова И. О.	К.Т.Н.		

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Нефтегазовый комплекс является одной из ключевых отраслей экономики Российской Федерации. Он включает в себя добычу нефти и газа, их транспортировку, переработку в топливо и сопутствующие продукты, а также нефтехимический сектор. Последний представляет собой промышленный комплекс, перерабатывающий нефть, ее отдельные фракции, и природный газ в сырье для химических производств и предприятия данных производств, которые перерабатывают сырье в продукты с более высокой добавленной стоимостью.

Полимерная промышленность является одним из ключевых направлений развития нефтегазового комплекса, поскольку ее продукция находит все новые применения в различных аспектах деятельности человека с развитием средств производства и ростом объемов выпуска товаров широкого потребления. Ключевым элементом данного сектора является формирующее его сырьевую базу производство олефинов в трубчатых печах, в которых проводится процесс термического разложения углеводородов. Таким образом, производство и потребление непредельных соединений, особенно этилена и пропилена, непрерывно растет.

При этом, перед странами с развитой в той или иной степени промышленностью стоят задачи, связанные с адаптацией своих экономик, что вызвано объективным общемировым процессом деглобализации. За предыдущее десятилетие во всех странах суммарно было принято порядка 11,5 тысяч протекционистских мер, направленных на ограничение передвижения товаров, трудовых ресурсов и капитала. Движущей силой данного процесса является развитие производительных сил общества. В соответствии с этим на сегодняшний день осуществляется переход на шестой технологический уклад, основной задачей которого является разработка и внедрение различных цифровых решений. В частности – математических моделей, реализованных в виде программного обеспечения и предназначенных для технического и экономического анализа, прогнозирования и управления процессами. От того, насколько успешно будет осуществлен данный переход зависит, кто запустит новый процесс глобализации, опираясь на свое технологическое преимущество.

В связи с этим возникает необходимость создания новых и интенсификации действующих производств олефинов. Применение математических моделей на установке пиролиза позволит увеличить выработку стратегически важной продукции и улучшить ее качество, что позволит повысить конкурентоспособность предприятий. Поэтому тема диссертационной работы, посвященная усовершенствованию процесса пиролиза бензиновой фракции на предприятиях нефтехимического профиля на основе анализа данных с действующих установок, создания математических моделей для описания процессов термической деструкции и

увеличения продолжительности эффективной работы печей является актуальной научно-прикладной задачей.

Работа выполнялась в рамках Гранта РФФИ № 21-79-00233.

Цель научно-квалификационной работы

Повышение эффективности процесса пиролиза бензиновой фракции путем оптимизации параметров рабочего режима трубчатой печи с использованием метода математического моделирования. Установление основных закономерностей коксообразования в данном процессе.

Для достижения поставленной цели решались следующие **основные задачи**:

1. Расчеты термодинамических и кинетических параметров реакций термической деструкции молекул и радикалов углеводородов, реакций поликонденсации и полимеризации в трубчатых печах пиролиза, верифицировать уточненную математическую модель процесса.

2. Установление закономерностей гидродинамических параметров течения парогазового потока в змеевике печи при проведении процесса пиролиза бензиновой фракции и их влияние на скорость образования и накопления высокоуглеродистых побочных продуктов.

3. Определение зависимости скорости накопления кокса в змеевике в зависимости от основных технологических параметров процесса;

4. Проведение расчетов с целью прогнозирования и повышения эффективности ведения процесса, а также определение оптимальных параметров режима работы реактора пиролиза для достижения наибольших выходов целевой продукции и длительности межрегенерационного цикла с применением математической модели.

Объектом исследования является трубчатая печь пиролиза бензиновой фракции, предназначенная для получения этилена, пропилена, бутадиена и иных непредельных соединений.

Предметом исследования является процесс пиролиза бензиновой фракции и сопряженный с ним побочный процесс коксообразования.

Научная новизна

1. Впервые предложена псевдостационарная модель пиролиза бензиновой фракции, учитывающая образование и накопление каталитического и пиролитического кокса с течением астрономического времени.

2. Установлены зависимости скорости накопления кокса и длительности межрегенерационного цикла от температуры процесса, давления сырья на входе в печь пиролиза, расхода углеводородного сырья и соотношения расходов пара разбавления и сырья. Длительность межрегенерационного цикла при накоплении кокса сокращается нелинейно: при увеличении скорости накопления с 0,02 до 0,03 г/с в среднем цикл сокращается на 2,1 дня; при увеличении скорости накопления кокса с 0,03 до 0,04 г/с в среднем цикл сокращается на 1,1 дня; при увеличении скорости накопления кокса с 0,04 до 0,11 г/с в среднем цикл сокращается на 0,13 дня.

3. На основе впервые установленных физико-химических закономерностей побочного процесса коксообразования, протекающего при пиролизе бензиновой фракции, предложен подход к повышению эффективности работы трубчатой печи пиролиза, обеспечивающий увеличение длительности межрегенерационных циклов на 40% и повышение тоннажа выработки этилена и пропилена на 57 и 112% соответственно.

Теоретическая значимость работы

Показана принципиальная возможность повышения эффективности работы печи пиролиза бензиновой фракции за счет снижения давления на входе змеевик пиролиза, снижения расхода углеводородного сырья и последующего увеличения доли пара разбавления в паросырьевой смеси, что позволяет добиться увеличения длительности межрегенерационных циклов, а также увеличения выработки целевых продуктов в течение цикла при некотором снижении их выходов.

Определен механизм образования и накопления кокса в змеевике печи, который подтверждается термодинамическими расчетами. Доказано, что скорость накопления кокса зависит от состава сырья и условий проведения процесса.

Практическая значимость работы

Разработана и реализована в виде программного обеспечения нестационарная модель процесса пиролиза бензиновой фракции в трубчатой печи с учетом накопления кокса. Данная модель позволяет прогнозировать влияние технологических параметров процесса и состава перерабатываемого сырья на содержание этилена, пропилена и прочих компонентов в пирогазе и на продолжительность межрегенерационных циклов на установках пиролиза нефтехимических производств.

Таким образом, результаты данного исследования применимы для повышения общей эффективности работы промышленной установки пиролиза.

Определены оптимальные режимы работы печи пиролиза бензиновой фракции в трубчатых печах пиролиза. При расходе сырья 3500 кг/ч, давлении на входе в реактор 0,3 МПа и соотношении расходов сырья и пара 1 к 1 длительность межрегенерационного цикла составляет 56 дней, что примерно на 40% больше исходной длины, в течение которых вырабатывается примерно 1920 т этилена и 1200 т пропилена. Данные значения на 57% и 112% больше исходных.

Методология исследования

Методологической основой диссертационного исследования является положение о возможности повышения эффективности процесса пиролиза бензиновой фракции в трубчатой печи на основе исследования механизма образования и накопления побочных высокоуглеродистых веществ, кокса, в змеевике реактора.

В основе самой методологии лежит системный подход к анализу химико-технологических процессов. Начальный этап заключается в установлении гидро- и термодинамических, а также кинетических

закономерностей процесса на начальном этапе. За ним следует составление математического описания процессов, за после чего происходит развитие программной реализации и ее проверка. При получении новых данных и средств исследования объекта, дополнительной информации о предмете моделирования данные этапы повторяются, и, таким образом, происходит итеративное улучшение модели.

Методы исследования

Квантово-химические методы расчета термодинамических параметров химических реакций, протекающих при переработке бензиновой фракции, в пакете Gaussian 16. Анализ веществ, присутствующих в реакционной системе, электронно-структурными методами, основанными на теории функционала плотности (DFT, Density Functional Theory).

Экспериментальные методы определения элементного состава образцов кокса. Метод газовой хроматографии высокого разрешения для определения детального углеводородного состава сырьевой бензиновой фракции.

Построение кинетической модели выполнено с использованием методологии по математическому моделированию многокомпонентных термических процессов на основе физикохимических закономерностей.

Численные методы исследования сложных химико-технологических процессов: методы Рунге-Кутты второго и четвертого порядков, метод конечных разностей решения систем дифференциальных уравнений в частных производных.

Апробация работ

Результаты исследований, проведенных в рамках диссертационной работы, представлены и обсуждены на научно-технических конференциях всероссийского и международного уровней: на III Всероссийской научно-практической конференции «Новые тенденции в развитии корпоративного управления и финансов в нефтеперерабатывающих и нефтехимических компаниях», г. Уфа, УГНТУ, 2020 г., на XIV Международном научно-техническом конгрессе студенческого отделения общества инженеров-нефтяников, г. Тюмень, ТИУ, 2021 г., на Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулева «Химия и химическая технология в XXI веке», г. Томск, ТПУ в 2020-2023 гг., на Международном симпозиуме имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр», г. Томск, ТПУ в 2020-2021 гг.

Имеется Акт апробации «Апробация компьютерной системы моделирования, обеспечивающей мониторинг и прогнозирование показателей печи пиролиза в рамках проекта RTO на УПУН ООО «Томскнефтехим» (Долганов И.М. Бунаев А.А., Долганова И.О.)

Личный вклад состоит в формулировке и обосновании актуальности направления проводимых исследований процесса пиролиза бензиновой фракции в трубчатых печах, проведении термодинамических исследований побочных реакций полимеризации и поликонденсации составляющих процесс

коксообразования, а также определении кинетических параметров целевых реакций термического разложения углеводородов, разработке кинетической, термодинамической и гидравлической модели с учетом накопления кокса, программной реализации данной модели, проведении исследовательских и оптимизационных расчетов на разработанной математической модели процесса, получении экспериментальных закономерностей и их теоретическом обосновании, формулировке основных положений диссертационной работы. Результаты исследований, полученные лично Бунаевым А. А. являются оригинальными.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 2 статьи в журнале из списка ВАК, 4 статьи в зарубежных изданиях, индексируемых базами Scopus, получено 1 авторское свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыта научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе проведен анализ современного состояния производства олефинов, процессов пиролиза, рассмотрены современные конструкции печей, рассмотрены имеющиеся на сегодняшний день модели пиролиза.

Во второй главе дана характеристика объекта исследования, приведены результаты хроматографического анализа сырьевой бензиновой фракции, представлен химизм процесса пиролиза.

В третьей главе представлены этапы разработки математической модели процесса пиролиза бензиновой фракции. Представлены формализованная схема превращений и кинетическая модель процесса. Предложен подход к описанию конструкции змеевика. Представлена термодинамическая модель процесса, описывающая изменения температуры реакционного потока.

В четвертой главе установлены зависимости продолжительности межрегенерационного цикла от основных рабочих параметров процесса: температуры, давления, расхода, соотношения расходов сырья и пара, состава сырья.

В пятой главе приведены зависимости скорости накопления кокса и выходов этилена и пропилена в начале и конце межрегенерационного цикла в зависимости от основных рабочих параметров. Также представлены результаты разработки комплекса технологических решений по оптимизации процесса пиролиза бензиновой фракции.

В заключении подведены итоги проведенного исследования, даны рекомендации по повышению ресурсоэффективности проведения процесса пиролиза бензиновой фракции в трубчатых печах.