

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и стратегическим проектам,

Национального исследовательского
Томского политехнического университета

А.С. Гоголев

2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Диссертация «Повышение эффективности работы печи пиролиза бензиновой фракции с использованием нестационарной математической модели» по специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий выполнена в Отделении химической инженерии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Соискатель Бунаев Аюр Алексеевич, 1996 года рождения, в 2023 году окончил аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по направлению подготовки 18.06.01. Химическая технология. Обучение в аспирантуре проходил с 2019 по 2023 год в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Основное место работы соискателя – Отделение химической инженерии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Справка о сдаче кандидатского экзамена по специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий выдана в 2024 г. федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Сведения о сдаче кандидатских экзаменов приведены в приложении к диплому об окончании аспирантуры федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по направлению подготовки 18.06.01. Химическая технология.

Тема диссертационной работы утверждена решением ученого совета Инженерной школы природных ресурсов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» от «28» декабря 2023 г., протокол №3.

Научный руководитель: Долганов Игорь Михайлович, к.т.н., федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,

Отделение химической инженерии, доцент, назначен приказом по организации №359-24/с от «25» декабря 2023 г.

Диссертация Бунаева А.А. является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи описания механизма образования кокса в процессе пиролиза бензиновой фракции и изложены новые научно обоснованные технологические решения для увеличения длительности межрегенерационного цикла работы печи пиролиза бензиновой фракции.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

- Актуальность темы и направленность исследования.

Полимерная промышленность является одним из ключевых направлений развития нефтегазового комплекса, поскольку ее продукция находит все новые применения в различных аспектах деятельности человека. Ключевым элементом данного сектора является формирующее его сырьевую базу производство олефинов пиролизом углеводородного сырья в трубчатых печах.

Таким образом, существует необходимость создания новых и интенсификации действующих производств. Применение математических моделей пиролиза позволит увеличить выработку стратегически важной продукции и улучшить ее качество. Поэтому тема диссертационной работы, посвященная усовершенствованию процесса пиролиза бензиновой фракции методом математического моделирования путем поиска оптимальных параметров, позволяющих увеличить продолжительность эффективной работы печей является актуальной научно-прикладной задачей.

- Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации.

Автор участвовал в постановке цели и задач исследования, обосновании актуальности научной работы, проведении исследований термодинамических закономерностей побочных реакций образования прекурсоров кокса в реакционном потоке и частиц кокса в пристеночной области змеевика печи пиролиза, а также определении кинетических параметров протекающих реакций, проведении исследовательских и оптимизационных расчетов с использованием разработанной математической модели процесса пиролиза бензиновой фракции и их теоретическом обосновании, формулировке основных положений диссертационной работы, подготовке и публикации статей, а также а также участия в выполнении грантов и договоров. Результаты исследований, полученные Бунаевым А.А. являются оригинальными.

- Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Степень достоверности результатов проведенных исследований обеспечена использованием современных аналитических методов и приборов, специализированного программного обеспечения, общепризнанных методик измерений, а также воспроизводимостью результатов экспериментальных исследований, проводимых при идентичных условиях. Относительная погрешность математической модели пиролиза бензиновой фракции не превышает 10%. Достоверность полученных результатов также подтверждается большим объемом обработанных экспериментальных данных, которые включают технологический режим работы печи пиролиза бензиновой фракции, результаты лабораторных анализов сырьевой бензиновой фракции, пирогаза и образцов кокса.

- Новизна результатов проведенных исследований.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Установлено, что уровень детализации предложенного механизма пиролиза, включающий 1057 реакций с участием 180 компонентов и побочные реакции образования кокса, обеспечивает адекватность моделирования работы печи пиролиза в широком интервале изменения технологических условий: температуры от 780 до 850°C, давление сырья на входе в печь от 0,3 до 0,7 МПа, расход сырья от 3500 до 5000 кг/ч, соотношение массовых расходов сырья и пара от 1/1 до 2/1.

2. Установлено, что отложение кокса в процессе пиролиза бензиновой фракции протекает через промежуточную стадию образования и осаждения цетрена и коронена в реакционном потоке и описывается схемой превращений, состоящей из 7 реакций конденсации ароматических веществ. При этом образование кокса из цетрена и коронена описывается 2 реакциями полимеризации, характеризующимися значениями кинетических параметров: предэкспоненциальные множители, K_0 , 1019 моль⁻⁶ · с⁻¹ и 1020 моль⁻⁵ · с⁻¹, энергии активации 35 кДж/моль для обеих реакций.

3. Установлено, что увеличению длительности межрегенерационного цикла работы печи пиролиза бензиновой фракции на 40% способствует снижение парциального давления углеводородов путем снижения давления сырья на входе в печь пиролиза с 0,4 до 0,3 МПа и увеличение доли водяного пара разбавления на уровне 50% масс. в паросырьевой смеси, что достигается снижением массового расхода сырья с 4300 до 3500 кг/ч при температуре на входе в радиантный змеевик пиролиза 780°C.

– Практическая значимость результатов проведенных исследований.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

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.

Показана принципиальная возможность повышения эффективности ведения процесса пиролиза бензиновой фракции путем изменения значений технологических параметров печи, что позволяет добиться увеличения длительности межрегенерационных циклов, а также увеличения выработки целевых продуктов в течение цикла.

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.

Имеется акт о внедрении технологической системы моделирования процесса пиролиза бензиновой фракции углеводородов в образовательном процессе Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Разработанная на основе математической модели компьютерная программа апробирована на одном из нефтехимических предприятий России, что подтверждается актом апробации. 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.)

- Ценность научных работ соискателя и полнота изложения материалов в опубликованных работах.

Статьи в центральной печати (перечень ВАК):

1. Долганов И. М., Бунаев А. А., Долганова (Шнидорова) И. О., Чиркина Н. А. Математическое моделирование пиролиза пропан-бутановой фракции с учетом накопления кокса // Деловой журнал Neftegaz.RU. - 2020 - №. 3. - С. 30-36.
2. Бунаев А. А., Долганов И. М., Долганова (Шнидорова) И. О. Нестационарная математическая модель пиролиза бензиновой фракции с учетом образования и накопления кокса // Деловой журнал Neftegaz.RU. - 2023 - № 5. - С. 14-22.

Статьи в зарубежных изданиях, индексируемых базами Scopus, Web of Science:

4. Dolganov I. M., Bunaev A. A., Dolganova (Shnidorova) I. O. Unsteady-State Mathematical Modeling of Hydrocarbon Feedstock Pyrolysis // Processes. - 2020 - Vol. 11 - №. 8 Article number 1394. - p. 1-13. doi: 10.3390/pr8111394
5. Bunaev A. A., Dolganov I. M., Dolganova (Shnidorova) I. O. Non-Stationary Computer-Aided Simulation of gasoline Fraction Pyrolysis // Petroleum and Coal. - 2021 - Vol. 63 - №. 3. - p. 612-620.
6. Bunaev A. A., Dolganov I. M., Dolganova (Shnidorova) I. O. Unsteady state simulation of gasoline fraction pyrolysis [Electronic resources] // South African Journal of Chemical Engineering. - 2022 - Vol. 42. - p. 146-155. doi: 10.1016/j.sajce.2022.08.007.
7. Бунаев А. А., Долганов И. М., Долганова (Шнидорова) И. О., Юрьев Е. М. Нестационарное моделирование пиролиза бензиновой фракции = Unsteady-state simulation of gasoline fraction pyrolysis // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. - 2023 - Т. 334 - № 3. - С. 73-88. doi: 10.18799/24131830/2023/3/3935.

Другие публикации:

8. Бунаев А. А., Долганова (Шнидорова) И. О., Долганов И. М., Чиркина Н. А., Чернышов М. Н., Межова М. Ю. Компьютерное моделирование пиролиза бензиновой фракции // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XXI Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 21-24 Сентября 2020. - Томск: ТПУ, 2020 - С. 357-358.
9. Бунаев А. А., Долганова (Шнидорова) И. О., Долганов И. М., Иванчина Э. Д., Чернышов М. Н., Межова М. Ю. Математическое моделирование процесса пиролиза // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXIV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 75-летию Победы в Великой Отечественной войне, Томск, 6-10 Апреля 2020. - Томск: Изд-во ТПУ, 2020 - Т. 2 - С. 274-276.

10. Бунаев А. А., Чернышов М. Н., Долганов И. М., Долганова (Шнидорова) И. О. Нестационарное математическое моделирование процесса пиролиза // Новые тенденции в развитии корпоративного управления и финансов в нефтеперерабатывающих и нефтехимических компаниях: материалы III Всероссийской научно-практической конференции, Уфа, 3-4 Декабря 2020. - Уфа: УГНТУ, 2020 - С. 9-12

11. Бунаев А. А., Долганова (Шнидорова) И. О., Долганов И. М., Чернышов М. Н. Нестационарное математическое моделирование пиролиза бензиновой фракции // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию горно-геологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания ТПУ, Томск, 5-9 Апреля 2021. - Томск: ТПУ, 2021 - Т. 2 - С. 255-257.

12. Бунаев А. А., Долганова (Шнидорова) И. О., Долганов И. М. Нестационарное математическое моделирование пиролиза бензиновой фракции // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XXII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера, посвященной 125-летию со дня основания Томского политехнического университета. В 2 томах, Томск, 17-20 Мая 2021. - Томск: ТПУ, 2021 - Т. 2 - С. 39-41.

13. Bunaev A. A., Dolganova (Shnidorova) I. O., Dolganov I. M. Unsteady benzene fraction pyrolysis simulation // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XXII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера, посвященной 125-летию со дня основания Томского политехнического университета. В 2 томах, Томск, 17-20 Мая 2021. - Томск: ТПУ, 2021 - Т. 2 - С. 189-190.

14. Bunaev A. A., Dolganov I. M., Dolganova (Shnidorova) I. O., Chernyshov M. N. Non-stationary simulation of gasoline fraction pyrolysis // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию горно-геологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания ТПУ, Томск, 5-9 Апреля 2021. - Томск: ТПУ, 2021 - Т. 2 - С. 514-515.

15. Bunaev A. A., Dolganova (Shnidorova) I. O., Dolganov I. M., Ivanchina E. D., Chernyshov M. N., Mezheva M. Y. Simulation of hydrocarbon pyrolysis non-stationary process // XXIV International Conference on Chemical Reactors (CHEMREACTOR-24): Abstracts, Milano, September 12-17, 2021. - Novosibirsk: Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, 2021 - p. 289-290.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

16. Бунаев А.А. Цифровая математическая модель процесса пиролиза углеводородного сырья с учетом его механизма протекания, физико-химических закономерностей и накопления кокса / А.А. Бунаев, И.М. Долганов, И.О. Долганова // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022668231. – 2022

– Соответствие содержания диссертации избранной специальности

Содержание диссертационной работы соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.6.13. «Процессы и аппараты химических технологий»:

- п.2. «Теория подобия, моделирование и масштабирование химико-технологических процессов и аппаратов, машин и агрегатов»;
- п.4 «Способы, приемы, методология исследования химических, тепловых, массообменных и совмещенных процессов, совершенствование их аппаратного оформления»;
- п.5 «Способы, приемы, методология исследования химических процессов, протекающих в условиях взаимного влияния на них гидродинамики и тепло-массообмена, совершенствование их аппаратного оформления»;
- п.7 «Способы, приемы, методология изучения нестационарных режимов протекания процессов в химической аппаратуре, в том числе с целью формирования предпосылок эффективного управления и автоматизации»;
- п.9. «Методы и способы интенсификации химико-технологических процессов, в том числе с помощью физико-химических воздействий на перерабатываемые материалы»;
- п.12 «Методы анализа, расчета и оптимизации показателей качества, устойчивости, надежности и безопасности химико-технологических систем»;
- п.13 «Развитие теории и практики создания процессов, аппаратов, технологий, обеспечивающих создание автоматизированных цифровых производств».

Диссертация «Повышение эффективности работы печи пиролиза бензиновой фракции с использованием нестационарной математической модели» Бунаева Аюра Алексеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий.

Заключение принято на заседании научного семинара Отделения химической инженерии. Присутствовало на заседании 15 чел.

Результаты голосования: «за» - 15 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол № 9 от «18» января 2024 г.

Председатель научного семинара
Короткова Елена Ивановна
Доктор химических наук, профессор
Заведующий кафедрой –
руководитель отделения на правах кафедры
Отделения химической инженерии



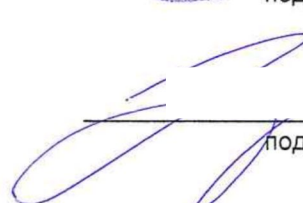
подпись

Секретарь заседания
Чузлов Вячеслав Алексеевич
Кандидат технических наук,
Доцент Отделения химической инженерии



подпись

Ученый секретарь ТПУ
Кулинич Екатерина Александровна
Кандидат технических наук



подпись