

ДОКУЧАЕВ
Игорь Станиславович

**ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ НЕФТЯНЫХ
ОСТАТКОВ В УСЛОВИЯХ ТЕРМИЧЕСКОГО КРЕКИНГА В
ПРИСУТСТВИИ РЕГЕНЕРИРОВАННЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ
ГИДРООЧИСТКИ И ДОНОРОВ ВОДОРОДА**

1.4.12. Нефтехимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата химических наук

САМАРА, 2025

Работа выполнена на кафедре «Химическая технология переработки нефти и газа» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель:

МАКСИМОВ Николай Михайлович
доктор химических наук, профессор, профессор
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет»

Официальные оппоненты:

РУДЯК Константин Борисович
доктор технических наук, генеральный
директор ООО «Объединенный центр
исследований и разработок», г. Москва

АНТОНОВ Сергей Александрович
кандидат химических наук, доцент,
заведующий лабораторией моторных масел
АО «Всероссийский научно-исследовательский
институт по переработке нефти», г. Москва

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет», г. Уфа**

Защита состоится «03» марта 2026 г. в 13:00 часов 00 мин на заседании диссертационного совета 24.2.377.03 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, ауд. 200.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.2.377.03; тел./факс. (846) 3322122, e-mail orgchem@samgtu.ru. В отзыве просим указывать почтовый адрес, номер телефона, электронную почту, наименование организации, должность, шифр и наименование научной специальности.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета (ул. Первомайская, 18) и на сайте диссертационного совета <https://d24237703.samgtu.ru/>

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.377.03
кандидат химических наук, доцент

Е.А. Ивлева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Постоянно растущий спрос на продукты нефтехимической промышленности создает дефицит мировых нефтяных запасов нефтей, в связи с чем возникает необходимость вовлечения в переработку тяжелых и битуминозных нефтей, а также более эффективного использования потенциала тяжелых нефтяных остатков на нефтехимических предприятиях.

Тяжелые нефтяные остатки характеризуются высокими значениями плотности и содержанием большого количества полициклических ароматических углеводородов и гетероорганических соединений, что усложняет их переработку из-за диффузионных ограничений и дезактивации катализаторов.

Известные процессы по переработке тяжелых нефтяных остатков имеют ряд недостатков, главными из которых, являются жесткие технологические условия, обусловленные высоким давлением газообразного водорода в системе, что ведет к высоким капитальным и эксплуатационным затратам и, как следствие, увеличению периода окупаемости вводимых в эксплуатацию установок.

Актуальной задачей нефтеперерабатывающей промышленности является разработка энергоэффективных технологий по облагораживанию и переработке тяжелой нефти и нефтяных остатков.

Степень разработанности темы исследования

Исследованиями в области термодеструктивных процессов переработки нефтяных остатков занимаются ученые, работающие за рубежом (Speight J.G., Ancheyta J., Stanislaus A.M., Bellussi G., Corma A., Gray M.R., Liang Z., Jinsen G., Zheng J., Hauser A. и др.), в России наиболее значимых результатов добились исследователи из ИНХС им. Топчиева, где проводились испытания по гидроконверсии гудрона с использованием получаемых *in situ* сульфидных катализаторов (Хаджиев С.Н., Максимов А.Л., Лядов А.С., Петрухина Н.Н., Кадиев Х.М., Кадиева М.Х.), а также исследователи из УГНТУ (Ахметов С.А., Ахметов А.Ф., Мустафин И.А., Ханов А.Р.).

Цель работы

Установление закономерностей химических превращений тяжелых нефтяных остатков в процессе термического крекинга в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки и доноров водорода.

Задачи работы

1. Исследование превращения модельных смесей в условиях крекинга с использованием регенерированного катализатора гидроочистки с использованием лабораторной установки проточного типа;
2. Исследование превращения мазута в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки в условиях автоклава;
3. Исследование превращения гудрона в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки в условиях автоклава;
4. Исследование превращения гудрона в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки и растворителей–доноров водорода (нефтяные фракции) в условиях автоклава;
5. Исследование превращения гудрона в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки и полимерных отходов в качестве доноров водорода в условиях автоклава.

Научная новизна

Впервые проведено систематическое исследование превращений тяжелых нефтяных остатков в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки. Предложен вариант решения проблемы утилизации отработанных катализаторов гидрокаталитических процессов.

Впервые исследовано превращение модельного нефтяного сырья в условиях крекинга в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки.

Впервые выполнено систематическое исследование превращений тяжелых нефтяных остатков в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки и нефтяных фракций гидрированного ЛГКК.

Впервые выполнено систематическое исследование превращений тяжелых нефтяных остатков в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки и отходов полимерной промышленности.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость обусловлена тем, что впервые выполнено систематическое исследование превращения тяжелых нефтяных остатков в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки и доноров водорода.

Полученные данные могут быть использованы при разработке технологий термодеструктивных процессов переработки тяжелого нефтяного сырья.

Совместная переработка тяжелых нефтяных остатков с вторичными фракциями переработки нефти или с отходами полимерной промышленности в присутствии регенерированного отработанного катализатора гидроочистки может увеличить эффективность процесса с точки зрения технико-экономических показателей (увеличение выхода светлых продуктов за счет подавления реакций коксообразования), экономики (используются отходы производства с низкой остаточной стоимостью) и экологии (предложен альтернативный вариант эффективного использования отработанного катализатора и полимерных отходов).

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследования крекинга модельных смесей в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки;
2. Результаты исследования термического крекинга мазута в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки;
3. Результаты исследования термического крекинга гудрона в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки;
4. Результаты исследования термического крекинга гудрона в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки и доноров водорода (нефтяных растворителей–доноров водорода и полимерных отходов)

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены на Региональной научно-технической конференции молодых специалистов АО «НК НПЗ» (2020, 2024, 2025, г. Новокуйбышевск), Региональной научно-технической конференции молодых специалистов АО «КНПЗ» (2022, 2023, 2024, 2025, г. Самара), XXIV Международной научно-технической конференции «Технология–2021» (2021, г. Северодонецк), Региональной научно-технической конференции молодых специалистов АО «СНХП» (2024, 2025, г. Самара), Всероссийской конференции «Устойчивое развитие, эко-инновации и «зеленые» экономика и технологии» (2021, 2023, г. Самара), Всероссийском семинаре «Инновационные и «зеленые» технологии в газохимии и

нефтедобыче» (2022, г. Самара), IX Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации ФТИ–2022» (2022, г. Екатеринбург), конференции «Переработка углеводородного сырья. Комплексные решения. Левинтерские чтения–2023» (2023, г. Самара), XXVIII Всероссийской конференции молодых ученых–химиков (с международным участием) (2025, г. Нижний Новгород), VII Российская конференция (с международным участием) «Актуальные проблемы нефтехимии» (2025, г. Пятигорск).

Личный вклад соискателя

Диссертант лично выполнял эксперименты на установках проточного типа и в автоклаве; определял физико–химические свойства сырья и полученных продуктов; принимал участие в интерпретации и обработке данных физико–химических методов анализа. Совместно с научным руководителем проводил анализ полученных экспериментальных данных, их обобщение и подготовку публикаций.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Работа изложена на 108 страницах, включает 30 таблиц и 21 рисунок. Список литературы содержит 201 наименование.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 8 статей (по списку ВАК), 35 публикации в сборниках тезисов докладов. Общий объем публикаций составляет 9,24 п.л., из них авторский объем публикаций составляет 2,60 а.п.л.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы переработки тяжелых нефтяных остатков, определена цель и задачи диссертационной работы.

В **первой главе** представлены литературные данные о химическом составе тяжелого нефтяного сырья, процессах переработки, катализаторах, донорах водорода и химических превращениях при переработке тяжелых нефтяных остатков

Тяжелые нефтяные остатки – фракции с началом кипения выше 520 °С, характеризующиеся высокой плотностью и вязкостью, высоким содержанием полициклических ароматических углеводородов и асфальтенов, а также гетероатомных соединений серы, азота, кислорода и органических соединений металлов (никель, ванадий, железо, медь и др.).

Сложность переработки тяжелых нефтяных остатков заключается в отравлении активных центров катализаторов металлами, содержащимися в сырье деструктивных процессов, а также в повышенном коксообразовании, которое связано с высоким содержанием асфальтенов.

Выделяются два принципа переработки тяжелых нефтяных остатков с целью увеличения соотношения Н/С в продукте: удаление из системы углерода или добавление водорода. Наиболее эффективным признан процесс гидрокрекинга с суспензионным слоем катализатора. В процессе используются водорастворимые, нефтерастворимые, твердые порошковые катализаторы, наноразмерные твердые порошковые катализаторы. В приведенном процессе компоненты тяжелого нефтяного сырья подвергаются термическому крекингу с последующим гидрированием образовавшихся предшественников кокса, что способствует снижению коксообразования. Катализатор в процессе способствует реакциям гидрирования и переноса водорода.

Существуют варианты замены газообразного водорода на альтернативные варианты использования доноров водорода (водяной пар, метан, синтез–газ,

растворители–доноры водорода, отходы полимерной промышленности).

По результатам анализа литературных данных обоснована актуальность исследования термического крекинга тяжелых нефтяных остатков в присутствии регенерированного алюмокобальтмолибденового катализатора гидроочистки и доноров водорода (промышленные нефтяные фракции и отходы полимерной промышленности).

Во **второй главе** описаны методики исследования образцов катализаторов и проведения исследований химических превращений модельных смесей и нефтяных фракций с последующим анализом физико–химических свойств сырья и продуктов.

В качестве катализатора процесса выбран образец алюмокобальтмолибденового регенерированного катализатора гидроочистки.

Анализ химического состава выполнен с использованием рентгенофлуоресцентного анализатора Shimadzu EDX800HS по предварительно построенным калибровочным зависимостям в соответствии с методикой ASTM D-4249. Пористая структура была определена методом низкотемпературной адсорбции–десорбции азота на порозиметре Quantochrome Autosorb-1. Кислотность образца катализатора определена методом термопрограммируемой десорбции аммиака (ТПД) с помощью прибора TPDRO 1100 (Thermo Scientific), оснащенный детектором по теплопроводности.

Исследование каталитической активности образца катализатора выполнено с использованием лабораторной установки проточного типа. В качестве реактивов при исследовании превращений модельного нефтяного сырья были использованы: толуол (ЧДА, ГОСТ 5789–78), н-гексан (ЧДА, ГОСТ 4517–2016), н-додекан (ЧДА, ГОСТ Р 8.951–2018) и декалин (ХЧ, СТП ТУ КОМП 1–866-24). Идентификация компонентов продуктовой смеси была проведена методом ГХ–МС на приборе Shimadzu GCMS–QP2010 Ultra с использованием колонки DB–PETRO с длиной 100 м и диаметром 0,25 мм. Количественный анализ состава продуктовой смеси произведен с помощью метода газовой хроматографии на приборе Кристалл–2000 с использованием колонки ZB–35 компании Zebron с длиной 30 м и диаметром 0,25 мм. Суммарное отклонение определения выходов продуктов превращений компонентов модельного нефтяного сырья по различным направлениям при температурах 430 °С, 450 °С и 470 °С не превышает максимальной погрешности определений 5 % при доверительной вероятности $P = 0,95$.

Эксперименты по крекингу тяжелого нефтяного сырья проведены в автоклаве. В качестве нефтяных фракций для исследования были выбраны мазут и образцы гудрона. Также в экспериментах были использованы доноры водорода – фракции легкого газойля каталитического крекинга и образцы полимеров (полиэтилен высокого давления (ПВД) по ГОСТ 16337–2022, полиэтилен низкого давления (ПНД) по ГОСТ 16338–85, полипропилен (ПП) по ГОСТ 26996–86 и бутылкаучук (БК) по ГОСТ ISO 2302–2016). В реактор загружался гудрон в количестве 270 г и, при необходимости, образец донора водорода в количествах 2,5 % масс, 5 % масс. и 10 % масс. на сырье процесса, а также фракция образца катализатора. Производился нагрев и выдержка сырьевой смеси в течение 30 минут при заданной температуре процесса. Далее реактор охлаждался до 25 °С и через газовый счетчик выгружался газ реакции. Производился расчет плотности газа по результатам хроматографии с использованием газового хроматографа Кристалл–2000М с детектором по теплопроводности и гелием в качестве газа–носителя. Выполнялся расчет массы выделившегося в результате эксперимента газа. Жидкий продукт реакции выгружался с фиксацией массы и подвергался разгонке по ГОСТ 2177–99 на узкие фракции: фр. нк–180 °С, фр. 180–350 °С и фр. 350–кк. Масса кокса определялась вычетом из исходной массы сырьевой смеси массы газа и массы

полученных жидких фракций. По результатам расчетов сводился общий материальный баланс процесса. Выход светлых фракций являлся суммой процентных выходов фр. нк–180 °С и фр. 180–350 °С. При использовании в качестве донора водорода фракций легкого газойля каталитического крекинга его масса вычиталась из массы полученных светлых фракций, что позволило исключить из результатов расчетов повышение выхода светлых фракций за счет введения растворителя–донора водорода. При введении в систему образцов полимеров материальный баланс рассчитывался исходя из представлений о совместной переработке гудрона и доноров водорода, как тяжелого нефтяного сырья. Максимальное отклонение полученных результатов выходов продуктов в экспериментах составляет $\pm 4,82$ % и не превышает допустимой погрешности определений 5 % при доверительной вероятности $P = 0,95$.

Далее проводился анализ физико–химических свойств полученных узких фракций. Плотность сырья и продуктов определялась по ГОСТ 31992.1–2012, кинематическая вязкость по ГОСТ 33–2000 (фр. 180–350 °С), йодные числа по ГОСТ 2070–82, коэффициент рефракции по ГОСТ 18995.2–2022. Содержание моно–, би– и полициклических ароматических углеводородов определялось методом ВЭЖХ на хроматографе LC–20 Prominence (Shimadzu). Содержание серы в мазуте, гудроне и нефтяных фракциях определялось с помощью рентгенофлуоресцентного анализатора Shimadzu EDX800HS. Кинематическая вязкость мазута, гудрона и фр. 350–кк вычислялась пересчетом из динамической, определенной с помощью реометра Modular Compact Rheometer MCR52 (Anton Paar GmbH, Austria) при различных параметрах.

В третьей главе обсуждаются результаты исследования превращения модельных нефтяных смесей.

Определено, что парафиновые углеводороды, представителем которых является н–додекан, вступают в реакции крекинга, изомеризации и уплотнения. Рассчитаны выходы продуктов реакций по выделенным направлениям. Данные о выходе продуктов превращения системы «н–додекан – толуол» при всех технологических параметрах представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Выход продуктов превращения системы «н–додекан – толуол» по различным направлениям

Температура, °С	Направление превращения	Выход по направлению при ОСПС (ч ⁻¹), % масс.							
		3		2		1		0,5	
430	крекинг	1,87	4,52	5,74	10,73	11,77	18,07	14,95	24,12
	изомеризация	1,31		2,32		2,95		3,26	
	уплотнение	1,34		2,67		3,35		5,90	
450	крекинг	13,22	15,43	19,51	24,21	29,95	35,89	43,50	55,86
	изомеризация	0,71		1,40		1,91		2,69	
	уплотнение	1,50		3,30		4,03		9,67	
470	крекинг	27,27	30,57	32,99	37,53	47,10	55,07	57,29	71,56
	изомеризация	0,42		0,67		0,93		1,17	
	уплотнение	2,88		3,87		7,03		13,11	

Наибольшие выходы продуктов во всем диапазоне температур соответствуют направлению крекинга н–додекана (430 °С – 1,87–14,95 % масс., 450 °С – 13,22–43,50 % масс., 470 °С – 27,27–57,29 % масс.). Выход продуктов крекинга и уплотнения увеличивается с ростом температуры процесса и уменьшением объемной скорости подачи сырья. Данные явления согласуются с известными для термического крекинга закономерностями. Наблюдается уменьшение выхода продуктов изомеризации при увеличении температуры процесса. При снижении объемной скорости подачи сырья

выход продуктов по данному направлению увеличивается при увеличении общей конверсии сырья. Нормированная диаграмма выходов продуктов превращения н-додекана по различным направлениям при ОСПС = 2 ч⁻¹ представлена на рисунке 1.

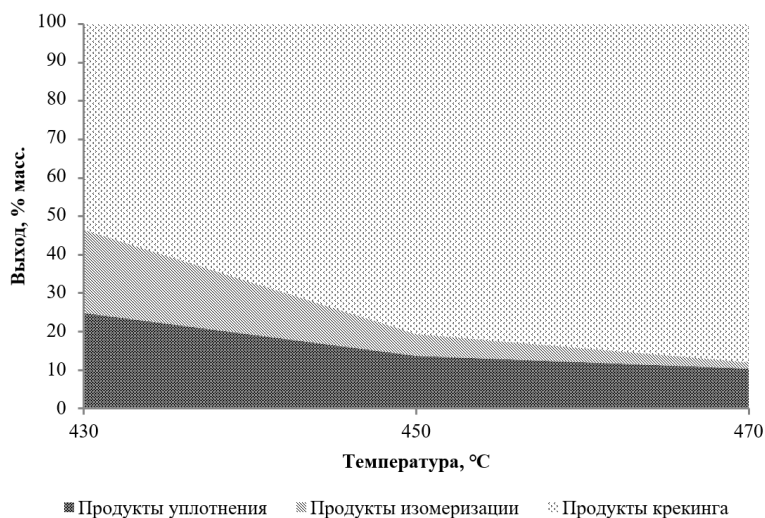


Рис. 1. Нормированная диаграмма выходов продуктов н-додекана при ОСПС = 2 ч⁻¹

Диаграмма показывает процентное соотношение значений выходов по представленным направлениям превращения для каждой температуры, что позволяет выявить относительный вклад каждого направления превращений в результат процесса, рассчитанный для каждой из выделенных групп. С ростом температуры образование продуктов крекинга начинает все больше превалировать над образованием других продуктов, что объясняется большей интенсивностью протекания реакций.

Выполнено исследование превращения нефтяных углеводородов в условиях крекинга нефтяного сырья на принятом образце катализатора с использованием модельной системы «декалин – толуол – н-гексан». Нафтеносодержащие углеводороды вступают в реакции дегидрирования, крекинга и изомеризации, а также уплотнения. Данные о выходах продуктов по направлениям при превращении системы «декалин – н-гексан – толуол» представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Выход продуктов превращения системы «декалин – н-гексан – толуол» по различным направлениям

Температура, °С	Направление превращения	Выход по направлению при ОСПС (ч ⁻¹), % масс.							
		3		2		1		0,5	
430	крекинг и изомеризация	2,26	5,36	4,48	13,94	6,70	27,81	7,81	42,83
	дегидрирование	2,79		8,89		19,33		30,27	
	в т.ч. в нафталин	2,37		7,61		17,49		27,36	
	уплотнение	0,31		0,57		1,78		4,75	
450	крекинг и изомеризация	4,53	14,13	5,40	24,49	7,54	46,26	9,09	60,80
	дегидрирование	8,95		17,89		34,89		46,41	
	в т.ч. в нафталин	7,70		15,98		31,07		42,21	
	уплотнение	0,66		1,20		3,83		5,30	
470	крекинг и изомеризация	9,65	22,85	11,18	37,44	13,91	59,20	15,71	72,96
	дегидрирование	12,19		24,39		41,19		51,40	
	в т.ч. в нафталин	9,51		21,22		35,19		45,53	
	уплотнение	1,02		1,87		4,10		5,85	

Декалин в системе «декалин – толуол – н-гексан» с наибольшей скоростью превращается в нафталин (430 °С – 2,37–27,36 % масс., 450 °С – 7,70–42,21 % масс., 470 °С – 9,51–45,53 % масс.), вступая в реакцию дегидрирования, в результате которой также образуется водород. Наибольшие значения выходов продуктов дегидрирования сохраняются во всем диапазоне температур, что указывает на значительную роль реакций дегидрирования в исследуемом процессе. При этом продукты уплотнения образуются в меньшем количестве, чем продукты дегидрирования, что позволяет сделать вывод о большей селективности катализатора по направлению реакций дегидрирования, а не конденсации.

Таким образом, при дегидрировании нафтеных углеводородов в выбранном температурном интервале образуется водород, который способен взаимодействовать с диеновыми углеводородами в термодеструктивных процессах переработки нефтяных остатков, замедляя процесс коксообразования на ранней стадии образования интермедиатов в соответствии с механизмом образования продуктов уплотнения, предложенным М.Е. Левинтером и Г.М. Панченковым.

Полученные результаты исследования доказывают перспективность применения регенерированного отработанного катализатора гидроочистки в качестве катализатора термодеструктивных процессов переработки тяжелых нефтяных остатков из-за его способности крекирования и изомеризации парафиновых углеводородов, а также дегидрирования нафтеных углеводородов, что при подборе умеренных технологических параметров может уменьшить выход продуктов уплотнения за счет подавления образования предшественников кокса.

В четвертой главе выполнены исследования превращения нефтяных фракций в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки и доноров водорода.

1. Термический крекинг мазута в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки

В качестве сырья процесса использован мазут (фр. 350–кк) с плотностью 0,956 г/см³ и содержанием серы 1,89 % масс.

Определено влияние степени дисперсности катализатора на результаты процесса. Выявлено, что наибольший выход светлых нефтепродуктов достигается при использовании фракции катализатора с размером частиц 0,50–1,00 мм.

Наибольшая эффективность процесса достигается при добавке в сырье процесса катализатора в количестве 0,10 % масс.

Проведено исследование влияния регенерированного катализатора гидроочистки на результаты крекинга мазута в диапазоне температур 450–470 °С. Материальные балансы процесса термического крекинга в присутствии катализатора в сравнении с материальными балансами термического крекинга представлены в таблице 3.

Введение катализатора в сырье процесса позволяет увеличить выход фр. нк–180 °С во всем диапазоне температур.

При термическом крекинге и термическом крекинге в присутствии катализатора фр. <0,10 мм выход фр. 180–350 °С находится на сопоставимом уровне с выходом соответствующей фракции, полученной в процессе термического крекинга, и незначительно зависит от температуры процесса.

Характер зависимости выхода светлых нефтепродуктов от температуры процесса идентичен при термическом крекинге и крекинге в присутствии катализатора фр. <0,10 мм, при этом более высокие значения выхода светлых наблюдаются при введении катализатора в систему.

Таблица 3 – Сравнение материального баланса термического крекинга в присутствии катализатора и термического крекинга при различных температурах процесса (0,1 МПа; 0,10 % масс. катализатора)

Статья баланса	Выход, % масс,								
	Термический крекинг, °С			Термический крекинг в присутствии катализатора (фр. <0,10), °С			Термический крекинг в присутствии катализатора, (фр. 0,50–1,00), °С		
	450	460	470	450	460	470	450	460	470
Приход:									
Сырье	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Расход:									
Газ	0,2	0,3	0,4	0,4	0,6	0,8	0,5	0,5	0,6
фр. нк–180 °С	8,0	10,8	16,5	10,8	14,4	19,3	9,5	17,2	18,2
фр. 180–350 °С	30,5	32,3	30,8	29,3	30,2	30,3	36,8	33,6	28,6
фр. 350–кк	51,0	35,8	19,0	49,5	34,5	17,0	42,8	26,9	21,6
Кокс + потери	10,3	20,8	33,3	10,0	20,3	32,6	10,4	21,8	31,0
Итого:	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Выход светлых, % масс.	38,7	43,4	47,4	40,5	45,2	50,4	46,7	51,3	47,7
Прирост светлых, % масс.	–	–	–	+1,8	+2,8	+3,0	+8,0	+7,9	+0,3

Это объясняется тем, что частицы с большой внешней удельной площадью поверхности быстрее закоксовываются и процесс продолжается в режиме термического крекинга. Выход светлых увеличивается с ростом температуры в диапазоне 450–470 °С, а при термическом крекинге в присутствии катализатора выше на 1,8–2,7 % масс. Стоит заметить, что необходимо ограничить температуру процесса температурой 460 °С для исключения повышения скорости образования продуктов уплотнения.

2. Термический крекинг гудрона в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки

В качестве сырья процесса крекинга в присутствии катализатора был использован гудрон (фр. 520–кк) с плотностью 0,988 г/см³, кинематической вязкостью (при 100 °С) 648 мм²/с и содержанием серы 2,29 % масс. Катализатором процесса являлся регенерированный алюмокобальтмолибденовый катализатор гидроочистки.

Наиболее эффективно процесс термического крекинга мазута и гудрона в присутствии регенерированного отработанного катализатора гидроочистки целесообразно проводить при размере частиц катализатора 0,50–1,00 мм и его содержании в сырье 0,10 % масс.,

Проведено сравнение результатов крекинга гудрона в присутствии регенерированного отработанного катализатора гидроочистки с результатами термического крекинга в интервале температур 440–470 °С.

Материальный баланс серии экспериментов отражен в таблице 4.

При всех вариантах проведения процесса крекинга с увеличением температуры повышается выход бензиновой фракции, а также газов процесса. При этом выход дизельной фракции несколько понижается.

Добавление в процесс образца исследуемого катализатора позволяет увеличить выход бензиновой фракции при сопоставимом выходе дизельной фракции, что связано с подавлением образования реакционноспособных соединений (радикалов) и промежуточных продуктов (олефинов).

Таблица 4 – Сравнение материального баланса термического крекинга в присутствии катализатора и термического крекинга при различных температурах процесса (0,1 МПа; 0,10 % масс. катализатора)

Статья баланса	Выход, % масс.							
	Термический крекинг, °С				Термический крекинг в присутствии катализатора (фр. 0,50–1,00), °С			
	440	450	460	470	440	450	460	470
Приход:								
Сырье	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Расход:								
Газ	0,3	0,6	0,9	1,5	0,1	0,7	0,7	1,5
фр. нк–180 °С	5,7	9,5	14,2	14,1	8,8	11,8	15,2	16,5
фр. 180–350 °С	28,2	29,1	24,5	22,7	28,9	27,3	24,6	21,2
фр. 350–кк	60,2	45,4	22,5	13,8	56,4	41,3	20,6	9,9
Кокс + потери	5,6	15,4	37,9	47,9	5,8	18,9	38,9	50,9
Итого:	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Выход светлых, % масс.	33,9	38,6	38,7	36,8	37,7	39,1	39,8	37,7
Прирост светлых, % масс.	–	–	–	–	+3,8	+0,5	+1,1	+0,9

Выход светлых фракций выше во всем диапазоне температур 440–470 °С при добавлении образца катализатора в количестве 0,10 % масс. Наибольший выход светлых фракций достигается при температуре 460 °С (39,8 % масс.).

При меньших температурах процесса крекинг протекает менее интенсивно, а при повышении температуры процесса усиливается вклад нежелательных реакций уплотнения и газообразования, что сопровождается значительным выходом кокса и уменьшением выхода светлых фракций.

Полученные в результате исследуемого процесса фр. нк–180 °С и фр. 180–350 °С требуют дальнейшей переработки в процессах гидроочистки на НПЗ с целью снижения содержания серы, а также вероятно, и вторичных процессах, увеличивающих качество нефтяных фракций для получения компонентов товарных моторных топлив.

3. Термический крекинг гудрона в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки и растворителей–доноров водорода

В качестве сырья процесса использован гудрон (фр. 520–кк) одного из промышленных предприятий с плотностью 0,996 г/см³, кинематической вязкостью (при 100 °С) 670 мм²/с и содержанием серы 2,44 % масс. Исходным растворителем–донором водорода выбрана фракция легкого газойля каталитического крекинга (ЛГКК (фр. 180–350 °С)). Также были подготовлены образцы растворителей гидрированием и фракционированием легкого газойля каталитического крекинга. Гидрирование выполнялось при давлении 3,0 МПа, температуре 340 °С и объемной скорости подачи сырья 2 ч^{–1}. Физико–химические свойства растворителей–доноров водорода представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Физико–химические свойства растворителей

Физико–химическое свойство	Значение				
	ЛГКК (фр. 180–350 °С) ¹	ГИД ЛГКК (фр. 180–350 °С) ²	ГИД ЛГКК (фр. 180–220 °С) ³	ГИД ЛГКК (фр. 220–260 °С) ⁴	ГИД ЛГКК (фр. 260–350 °С) ⁵
Плотность, ρ_{15}^{15}	0,901	0,888	0,822	0,854	0,896

Продолжение таблицы 5

Физико–химическое свойство	Значение				
	ЛГКК (фр. 180–350 °С) ¹	ГИД ЛГКК (фр. 180–350 °С) ²	ГИД ЛГКК (фр. 180–220 °С) ³	ГИД ЛГКК (фр. 220–260 °С) ⁴	ГИД ЛГКК (фр. 260–350 °С) ⁵
Кинематическая вязкость при 20, мм ² /с	2,84	2,60	1,06	1,46	2,67
Содержание ароматических УВ, % масс.	78,5	78,5	78,1	80,6	80,1
в т.ч.: МАУ, % масс.	26,3	31,2	65,1	48,8	14,1
БАУ, % масс.	34,1	33,1	12,7	30,4	42,4
ПАУ, % масс.	18,1	14,2	0,3	1,4	23,7
Коэффициент рефракции	1,510	1,501	1,461	1,477	1,505
Содержание серы, ppm (% масс.)	1,07 (% масс.)	5668	843	1898	5256
Йодное число	17,1	4,5	6,7	3,3	2,8

¹ Образец растворителя – легкий газойль каталитического крекинга (фр. 180–350 °С)

² Образец растворителя – гидрированный легкий газойль каталитического крекинга (фр. 180–350 °С)

³ Образец растворителя – гидрированный легкий газойль каталитического крекинга (фр. 180–220 °С)

⁴ Образец растворителя – гидрированный легкий газойль каталитического крекинга (фр. 220–260 °С)

⁵ Образец растворителя – гидрированный легкий газойль каталитического крекинга (фр. 260–350 °С)

Из данных таблицы видно, что у образца ГИД ЛГКК (фр. 180–350 °С) снижены значения плотности, кинематической вязкости, коэффициента рефракции и содержания серы относительно значений, соответствующих исходному образцу растворителя ЛГКК (фр. 180–350 °С). Также наблюдается повышение значений вышеперечисленных физико–химических свойств с утяжелением фракций гидрированного легкого газойля каталитического крекинга. Значение йодного числа уменьшается при гидрировании исходного образца растворителя и утяжелении фракций.

Содержание ПАУ уменьшается после гидрирования фр. 180–350 °С легкого газойля каталитического крекинга. Основная часть ПАУ, по данным анализа узких фракций, концентрируется во фр. 260–350 °С. По мере утяжеления фракционного состава гидрированного легкого газойля каталитического крекинга уменьшается содержание МАУ, при этом содержание БАУ и ПАУ возрастает.

3.1 Исследование влияния водорода на процесс крекинга гудрона в присутствии катализатора

Выполнены эксперименты по исследованию влияния водорода на конверсию тяжелого нефтяного сырья при температуре 460 °С в режиме термического крекинга и термического крекинга в присутствии катализатора при давлении 0,1 МПа (без водорода) и 1,5 МПа (в присутствии водорода). Материальный баланс представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Материальный баланс серии экспериментов по исследованию влияния водорода на результаты крекинга (460 °С; фр. 0,5–1,0 мм; 0,10 % масс. катализатора)

Статья баланса	Выход, % масс.			
	ТК ¹	КАТ ²	ТК+ВОД ³	КАТ+ВОД ⁴
Приход:				
Сырье	100,0	100,0	100,0	100,0
Расход:				
Газ	0,9	1,0	1,2	1,2
фр. нк–180 °С	12,4	13,1	13,3	14,6
фр. 180–350 °С	20,8	21,4	22,5	21,6

Продолжение таблицы 6

Статья баланса	Выход, % масс.			
	ТК ¹	КАТ ²	ТК+ВОД ³	КАТ+ВОД ⁴
Расход:				
фр. 350–кк	25,3	25,5	29,8	29,0
Кокс + потери	40,5	39,0	33,2	33,6
Итого:	100,0	100,0	100,0	100,0
Выход светлых, % масс.	33,2	34,5	35,8	36,2
Прирост светлых, % масс.	–	+1,3	+2,6	+3,0
Снижение выхода кокса, % масс.	–	–1,5	–7,3	–6,9

¹ Термический крекинг

² Термический крекинг в присутствии катализатора

³ Термический крекинг в присутствии водорода

⁴ Термический крекинг в присутствии катализатора и водорода

При конверсии гудрона без водорода наблюдается повышение выхода светлых фракций на 1,3 % масс. при варианте процесса с добавлением катализатора (КАТ), относительно термического процесса (ТК) за счет увеличения выхода бензиновых и дизельных фракций. Введение водорода в систему положительно сказывается на результатах аналогичных процессов, что подтверждается значительным снижением выхода кокса относительно термического крекинга (на 7,3 % масс. в системе без катализатора (ТК+ВОД) и на 6,9 % масс. в системе с катализатором (КАТ+ВОД). Также наблюдается повышение выхода светлых фракций на 2,6 % масс. (ТК+ВОД) и на 3,0 % масс. (КАТ+ВОД) относительно термического крекинга.

3.2 Исследование влияния фракционного состава растворителя–донора водорода на результаты процесса

Проведены эксперименты по влиянию растворителей–доноров водорода на процесс крекинга гудрона в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки. Материальный баланс серии экспериментов по исследованию влияния фракционного состава на результаты процесса при 460 °С представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Материальный баланс серии экспериментов по исследованию влияния фракционного состава растворителя (460 °С; 0,1 МПа; фр. 0,5–1,0 мм; 0,10 % масс. катализатора, 5,0 % масс. растворителя)

Статья баланса	Выход, % масс.					
	ТК ¹	ЛГКК (фр. 180– 350 °С) ²	ГИД ЛГКК (фр. 180– 350 °С) ³	ГИД ЛГКК (фр. 180– 220 °С) ⁴	ГИД ЛГКК (фр. 220– 260 °С) ⁵	ГИД ЛГКК (фр. 260– 350 °С) ⁶
Приход:						
Сырье	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Расход:						
Газ	0,9	1,2	1,4	1,4	1,4	1,5
фр. нк–180 °С	12,4	13,3	13,3	15,0	14,1	13,7
фр. 180–350 °С	20,8	20,1	20,5	20,4	21,5	19,7
фр. 350–кк	25,3	32,0	32,3	33,8	33,2	31,3
Кокс + потери	40,5	33,4	32,5	29,4	29,8	33,8
Итого:	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Продолжение таблицы 7

Статья баланса	Выход, % масс.					
	ТК ¹	ЛГКК (фр. 180– 350 °С) ²	ГИД ЛГКК (фр. 180– 350 °С) ³	ГИД ЛГКК (фр. 180– 220 °С) ⁴	ГИД ЛГКК (фр. 220– 260 °С) ⁵	ГИД ЛГКК (фр. 260– 350 °С) ⁶
Выход светлых, % масс.	33,2	33,4	33,8	35,4	35,6	33,4
Прирост светлых, % масс.	–	+0,2	+0,4	+2,2	+2,4	+0,2
Снижение выхода кокса, % масс.	–	–7,1	–8,0	–11,1	–10,7	–6,7

¹ Термический крекинг

² Термический крекинг в присутствии катализатора и легкого газойля каталитического крекинга (фр. 180–350 °С)

³ Термический крекинг в присутствии катализатора и гидрированного легкого газойля каталитического крекинга (фр. 180–350 °С)

⁴ Термический крекинг в присутствии катализатора и гидрированного легкого газойля каталитического крекинга (фр. 180–220 °С)

⁵ Термический крекинг в присутствии катализатора и гидрированного легкого газойля каталитического крекинга (фр. 220–260 °С)

⁶ Термический крекинг в присутствии катализатора и гидрированного легкого газойля каталитического крекинга (фр. 260–350 °С)

Выход кокса при использовании всех образцов растворителя значительно ниже, относительно термического крекинга (снижение на 6,7–11,1 % масс.) и сопоставим с вариантом крекинга в присутствии газообразного водорода.

Сравнение результатов процесса с использованием образца ЛГКК (фр. 180–350 °С) и образца ГИД ЛГКК (фр. 180–350 °С) показывает больший выход светлых фракций (прирост в 0,4 % масс.) при варианте с использованием образца, подготовленного гидрооблагораживанием. Также в присутствии гидрированной фракции наблюдается более эффективное снижение коксообразования (8,0 % масс. относительно термического процесса). В результате сделан вывод о целесообразности использования образцов растворителей с дополнительной подготовкой в виде насыщения водородом.

Различная эффективность по выходу светлых фракций и снижению коксообразования объясняется различными физико-химическими свойствами исследуемых образцов растворителей и различным содержанием водорода в данных фракциях.

Образцы ГИД ЛГКК (фр. 180–220 °С) и ГИД ЛГКК (фр. 220–260 °С) преимущественно содержат МАУ и ПАУ, которые способствуют растворению асфальтенов и предотвращают их агрегацию. При анализе влияния фракционного состава растворителя сделан вывод о большем выходе светлых фракций при использовании образца растворителя ГИД ЛГКК (фр. 220–260 °С) – прирост в 2,4 % масс. относительно термического крекинга (ТК). Также стоит отметить уменьшение выхода кокса на 10,7 % масс. относительно термического процесса (ТК) и на 3,8 % масс. относительно крекинга в присутствии катализатора и водорода (КАТ+ВОД). Данная фракция рекомендована для дальнейших исследований. Образец растворителя ГИД ЛГКК (фр. 260–350 °С) проявляет наименьшую активность в реакциях подавления коксообразования, что связано с большим содержанием ПАУ, которые обладают меньшей растворяющей способностью и склонны к реакциям уплотнения.

3.3 Исследование влияния содержания растворителя–донора водорода на результаты процесса

Выполнено исследование влияния содержания растворителя в системе на результаты крекинга гудрона в присутствии образца катализатора. Материальный баланс серии при 460 °С отражен в таблице 8.

Таблица 8 – Материальный баланс серии экспериментов по исследованию влияния содержания растворителя (460 °С; 0,1 МПа; фр. 0,5–1,0 мм; 0,10 % масс. катализатора)

Статья баланса	Выход, % масс.			
	ТК ¹	ГИД ЛГКК (фр. 220– 260 °С), 2,5 % масс. ²	ГИД ЛГКК (фр. 220– 260 °С), 5,0 % масс. ³	ГИД ЛГКК (фр. 220– 260 °С), 10,0 % масс. ⁴
Приход:				
Сырье	100,0	100,0	100,0	100,0
Расход:				
Газ	0,9	1,4	1,4	1,3
фр. нк–180 °С	12,4	14,2	14,1	15,3
фр. 180–350 °С	20,8	21,0	21,5	18,7
фр. 350–кк	25,3	27,6	33,2	38,0
Кокс + потери	40,5	35,8	29,8	26,7
Итого:	100,0	100,0	100,0	100,0
Выход светлых, % масс.	33,2	35,2	35,6	34,0
Прирост светлых, % масс.	–	+2,0	+2,4	+0,8
Снижение выхода кокса, % масс.	–	–4,7	–10,7	–13,8

¹ Термический крекинг

² Термический крекинг в присутствии катализатора и гидрированного легкого газойля каталитического крекинга (фр. 220–260 °С) в количестве 2,5 % масс.

³ Термический крекинг в присутствии катализатора и гидрированного легкого газойля каталитического крекинга (фр. 220–260 °С) в количестве 5,0 % масс.

⁴ Термический крекинг в присутствии катализатора и гидрированного легкого газойля каталитического крекинга (фр. 220–260 °С) в количестве 10,0 % масс.

Наблюдается снижение выхода кокса с увеличением содержания образца растворителя в системе. Значение выхода светлых фракций достигает своего максимума при введении в сырье процесса 5,0 % масс. образца растворителя (выход светлых – 35,6 % масс.). При дальнейшем увеличении содержания растворителя до 10,0 % масс. интенсифицируются реакции переноса водорода от молекул донора водорода к молекулам олефинов, что способствует подавлению образования продуктов уплотнения, но также и замедляет крекинг по радикально–цепному механизму, поэтому выход светлых фракций снижается. Выход кокса снижается с увеличением содержания растворителя при одновременном повышении выхода фр. 350–кк, что позволяет сделать вывод о подавлении реакций уплотнения за счет физического (растворение и препятствие агрегации асфальтенов) и химического (допирование водорода предшественникам кокса) действия растворителя. с увеличением содержания образца растворителя в системе.

Физико–химические свойства узких фракций серии экспериментов представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Физико–химические свойства узких фракций серии экспериментов по исследованию влияния содержания растворителя

Физико–химическое свойство	Значение			
	ТК ¹	ГИД ЛГКК (фр. 220– 260 °С), 2,5 % масс. ²	ГИД ЛГКК (фр. 220– 260 °С), 5,0 % масс. ³	ГИД ЛГКК (фр. 220– 260 °С), 10,0 % масс. ⁴
фр. нк–180 °С				
Плотность, ρ_{15}^{15}	0,736	0,725	0,735	0,726
Йодное число, г I/100 г	26,5	20,0	20,5	23,2
Содержание серы, ppm	3842	3546	3412	3301
Коэффициент рефракции	1,414	1,468	1,435	1,464

Продолжение таблицы 9

фр. 180–350 °С				
Плотность, ρ_{15}^{15}	0,853	0,855	0,857	0,865
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с	3,00	2,71	2,74	2,61
Йодное число, г I/100 г	20,6	6,3	9,9	12,9
Содержание серы, % масс.	1,08	1,01	1,01	0,91
Содержание ароматических УВ, % масс.	57,0	60,1	59,9	65,6
в т.ч.: МАУ, % масс.	28,4	28,4	30,6	29,8
БАУ, % масс.	23,5	25,5	25,2	31,9
ПАУ, % масс.	5,1	6,2	4,1	3,9
фр. 350–кк				
Плотность, ρ_{15}^{15}	0,995	1,081	1,044	0,999
Кинематическая вязкость при 100 °С, мм ² /с	192,1	113,6	131,6	131,9

¹ Термический крекинг

² Термический крекинг в присутствии катализатора и гидрированного легкого газойля каталитического крекинга (фр. 220–260 °С) в количестве 2,5 % масс.

³ Термический крекинг в присутствии катализатора и гидрированного легкого газойля каталитического крекинга (фр. 220–260 °С) в количестве 5,0 % масс.

⁴ Термический крекинг в присутствии катализатора и гидрированного легкого газойля каталитического крекинга (фр. 220–260 °С) в количестве 10,0 % масс.

Наблюдается значительное снижение йодного числа и содержания серы во фр. нк–180 °С и фр. 180–350 °С при введении растворителя в систему. Также стоит отметить некоторое повышение значений плотности у фр. 180–350 °С с увеличением содержания образца растворителя в системе. Показательным является снижение кинематической вязкости крекинг–остатка во всех процессах с введением водорода. Введение в систему образца ГИД ЛГКК (фр. 220–260 °С) с последующим выделением вместе с полученной фр. 180–350 °С позволяет снизить вязкость фр. 350–кк в 1,46–1,69 раз в зависимости от дозировки растворителя.

4. Термический крекинг гудрона в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки и образцов полимеров

В качестве сырья процесса использован гудрон с плотностью 0,991 г/см³, кинематической вязкостью (100 °С) 663 мм²/с и содержанием серы 2,35 % масс. Катализатор процесса – регенерированный отработанный алюмокобальтмолибденовый катализатор гидроочистки фр. 0,5–1,0 мм.

Выполнено исследование физико–химических свойств образцов полимеров, принятых в качестве добавок к сырью крекинга (полиэтилен высокого давления (ПВД), полиэтилен низкого давления (ПНД), полипропилен (ПП), бутилкаучук (БК)). В таблице 10 представлены сводные данные по результатам термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии.

Таблица 10 – Сводные данные по результатам ТГА и ДСК

Образец полимера	Температура разложения, °С	Температура самовоспламенения, °С	Температура глубокого разложения, °С
Полиэтилен высокого давления (ПВД)	251	334	412
Полиэтилен низкого давления (ПНД)	271	392	442
Полипропилен (ПП)	224	335	426
Бутилкаучук (БК)	257	187	320

Образцы полимеров подвергаются разложению в диапазоне температур 224–271 °С. Температура разложения исследуемых образцов полимеров увеличивается в ряду: ПП < ПВД < ПНД < БК. Наименьшие значения температуры разложения зафиксированы у образцов ПП (224 °С) и ПВД (251 °С).

Температуры самовоспламенения находятся в диапазоне температур 187–392 °С. Данное свойство обусловлено стабильностью связей в полимерной цепи и физической структурой полимера. Наименьшими температурами глубокого разложения характеризуются образцы БК (320 °С) и ПВД (412 °С).

4.1 Исследование влияния содержания полимера на результаты процесса

Выполнены эксперименты по исследованию влияния содержания образца полимера (на примере ПВД, характеризующегося наименьшей температурой разложения при полной деструкции без остатка) на конверсию тяжелого нефтяного сырья при температуре 460 °С в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки. Материальный баланс представлен в таблице 11.

Таблица 11 – Материальный баланс серии экспериментов по исследованию влияния содержания образца полимера (460 °С; 0,1 МПа; фр. 0,5–1,0 мм; 0,10 % масс. катализатора)

Статья баланса	Выход, % масс.				
	ТК ¹	КАТ ²	ПВД, 2,5 % масс. ³	ПВД, 5,0 % масс. ⁴	ПВД, 10,0 % масс. ⁵
Приход:					
Сырье	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Расход:					
Газ	1,0	1,1	0,7	0,7	0,8
фр. нк–180 °С	12,9	13,5	12,5	11,6	11,0
фр. 180–350 °С	21,9	22,5	22,9	22,6	21,6
фр. 350–кк	27,2	27,4	34,2	36,9	43,1
Кокс + потери	37,0	35,5	29,7	28,2	23,5
Итого:	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Выход светлых, % масс.	34,8	36,0	35,4	34,2	32,6
Прирост светлых, % масс.	–	+1,2	+0,6	–0,6	–2,2
Снижение выхода кокса, % масс.	–	–1,5	–7,3	–8,8	–13,5

¹ Термический крекинг

² Термический крекинг в присутствии катализатора

³ Термический крекинг в присутствии катализатора и образца полиэтилена высокого давления в количестве 2,5 % масс.

⁴ Термический крекинг в присутствии катализатора и образца полиэтилена высокого давления в количестве 5,0 % масс.

⁵ Термический крекинг в присутствии катализатора и образца полиэтилена высокого давления в количестве 10,0 % масс.

Результаты экспериментов свидетельствуют о снижении выхода кокса при добавке в систему образцов ПВД в количествах 2,5–10,0 % масс. на сырье. При увеличении концентрации полимера наблюдается уменьшение выхода кокса при снижении выхода светлых фракций, что объясняется перераспределением водорода между полимером и тяжелыми нефтяными остатками, что подавляет его коксование, но и снижает скорость реакций крекинга. Наибольшая эффективность по выходу светлых фракций достигнута при добавлении 2,5 % масс. ПВД – прирост светлых фракций составляет 0,6 % масс. при снижении выхода кокса на 7,3 % масс.

В таблице 12 представлено сравнение физико–химических свойств полученных узких фракций.

Таблица 12 – Физико–химические свойства узких фракций серии экспериментов по исследованию влияния содержания образца полимера

Физико–химическое свойство	Значение				
	ТК ¹	КАТ ²	ПВД, 2,5 % масс. ³	ПВД, 5,0 % масс. ⁴	ПВД, 10,0 % масс. ⁵
фр. нк–180 °С					
Плотность, ρ_{15}^{15}	0,731	0,734	0,739	0,726	0,731
Йодное число, г I /100 г	38,00	39,39	40,1	34,6	38,0
Содержание серы, ppm	3929	3850	3688	3402	3357
Коэффициент рефракции	1,411	1,415	1,410	1,413	1,418
фр. 180–350 °С					
Плотность, ρ_{15}^{15}	0,858	0,859	0,848	0,857	0,849
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с	3,05	3,10	3,40	3,48	4,36
Йодное число, г I /100 г	21,8	30,1	23,37	27,70	27,31
Содержание серы, % масс.	1,10	1,05	1,03	1,03	0,99
Коэффициент рефракции	1,471	1,470	1,482	1,475	1,465
Содержание ароматических УВ, % масс.	56,8	58,5	63,2	60,2	56,3
в т.ч.: МАУ, % масс.	29,8	26,9	22,5	25,8	26,6
БАУ, % масс.	20,5	24,1	26,2	21,9	20,2
ПАУ, % масс.	6,5	7,5	14,5	12,5	9,5
фр. 350–кк					
Плотность, ρ_{15}^{15}	0,913	0,990	0,963	0,969	0,989
Кинематическая вязкость, при 100 °С, мм ² /с	195	210	214	220	237

¹ Термический крекинг

² Термический крекинг в присутствии катализатора

³ Термический крекинг в присутствии катализатора и образца полиэтилена высокого давления в количестве 2,5 % масс.

⁴ Термический крекинг в присутствии катализатора и образца полиэтилена высокого давления в количестве 5,0 % масс.

⁵ Термический крекинг в присутствии катализатора и образца полиэтилена высокого давления в количестве 10,0 % масс.

Происходит снижение содержания серы у фр. нк–180 °С и фр. 180–350 °С при введении образцов полимеров в систему. Также наблюдается незначительно повышение кинематической вязкости фр. 180–350 °С, при этом значение увеличивается с повышением содержания образца полимера. В то же время полученные значения вязкости удовлетворяют требованиям ГОСТ 32511–2013. Значения йодного числа находятся на сопоставимом уровне у фр. нк–180 °С и несколько увеличиваются у фр. 180–350 °С. Наблюдается увеличение содержания ПАУ во фр. 180–350 °С при введении образца полимера, что сопровождается большим выходом данной фракции.

Также несколько увеличиваются значения плотности и вязкости полученных фр. 350–кк при введении образца полимера, что объясняется большим выходом данной фракции при уменьшении выхода кокса.

4.2 Исследование влияния добавки различных образцов полимеров на результаты процесса

Выполнено исследование влияния добавки образцов полиэтилена высокого давления (ПВД), полиэтилена низкого давления (ПНД), полипропилена (ПП) и бутылкачука (БК) на результаты процесса. Материальный баланс серии экспериментов представлен в таблице 13.

Таблица 13 – Материальный баланс серии экспериментов по исследованию влияния различных образцов полимеров (460 °С; 0,1 МПа; фр. 0,5–1,0 мм; 0,10 % масс. катализатора, 2,5 % масс. образца полимера)

Статья баланса	Выход, % масс.				
	ТК ¹	ПВД ²	ПНД ³	ПП ⁴	БК ⁵
Приход:					
Сырье	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Расход:					
Газ	1,0	0,7	0,7	0,5	0,7
фр. нк–180 °С	12,9	12,5	14,0	13,6	14,0
фр. 180–350 °С	21,9	22,9	19,3	22,0	19,3
фр. 350–кк	27,2	34,2	28,5	28,2	28,5
Кокс + потери	37,0	29,7	37,5	35,7	37,5
Итого:	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Выход светлых, % масс.	34,8	35,4	33,3	35,6	33,3
Прирост светлых, % масс.	–	+0,6	–1,5	+0,8	–1,5
Снижение выхода кокса, % масс.	–	–7,3	–1,5	–1,3	+0,5

¹ Термический крекинг

² Термический крекинг в присутствии катализатора и образца полиэтилена высокого давления

⁴ Термический крекинг в присутствии катализатора и образца полиэтилена низкого давления

⁵ Термический крекинг в присутствии катализатора и образца полипропилена

⁶ Термический крекинг в присутствии катализатора и образца бутилкаучука

По данным таблицы можно сделать вывод о значительно меньшей эффективности снижения коксообразования при добавлении в систему ПП (снижение на 1,3 % масс. относительно термического крекинга), относительно добавки ПВД (снижение на 7,3 % масс. относительно термического крекинга). При добавлении БК ингибирование реакций уплотнения не наблюдается. Выход светлых фракций увеличивается относительно термического крекинга при добавлении ПВД и ПП на 0,6 % масс. и 0,8 % масс. соответственно.

Результаты исследований показали эффективность совместной переработки гудрона с образцами полимеров в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки. Наблюдается повышение выхода светлых фракций и снижение выхода кокса.

5. Сравнительный анализ результатов крекинга гудрона в присутствии различных доноров водорода

В качестве сырья процесса использован гудрон с плотностью 0,991 г/см³, кинематической вязкостью (100 °С) 663 мм²/с и содержанием серы 2,35 % масс. Катализатор процесса – регенерированный отработанный алюмокобальтмолибденовый катализатор гидроочистки фр. 0,5–1,0 мм.

В таблице 14 представлен сравнительный материальный баланс серии экспериментов по крекингу в отсутствии водорода, крекингу с добавкой полиэтилена высокого давления (ПВД) и крекингу с добавкой фракции гидрированного легкого газойля каталитического крекинга ГИД ЛГКК (фр. 220–260 °С).

Результаты исследования свидетельствуют о значительном снижении выхода кокса при введении доноров–водорода (на 7,3–10,3 % масс. в зависимости от варианта проведения процесса).

Выход светлых фракций увеличивается в процессах переработки гудрона в присутствии донора водорода и образца катализатора, относительно совместной термической переработки (прирост в 1,0 % масс. при использовании ПВД и прирост в 0,9 % масс. при использовании ГИД ЛГКК (фр. 220–260 °С).

Таблица 14 – Сравнительный материальный баланс серии экспериментов по термическому крекингу и крекингу в присутствии доноров–водорода (460 °С; 0,1 МПа; фр. 0,5–1,0 мм; 0,10 % масс. катализатора)

Статья баланса	Выход, % масс.					
	ТК ¹	КАТ ²	ПВД (без кат.), 2,5 % масс. ³	ПВД, 2,5 % масс. ⁴	ГИД ЛГКК (фр. 220– 260 °С) (без кат.), 5,0 % масс. ⁵	ГИД ЛГКК (фр. 220– 260 °С), 5,0 % масс. ⁶
Приход:						
Сырье	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Расход:						
Газ	1,0	1,1	0,8	0,7	0,4	1,4
фр. нк–180 °С	12,9	13,5	12,3	12,5	13,6	14,4
фр. 180–350 °С	21,9	22,5	22,1	22,9	22,2	22,3
фр. 350–кк	27,2	27,4	35,5	34,2	34,3	35,2
Кокс + потери	37,0	35,5	29,3	29,7	29,5	26,7
Итого:	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Выход светлых, % масс.	34,8	36,0	34,4	35,4	35,8	36,7
Прирост светлых, % масс.	–	+1,2	–0,4	+0,6	+1,0	+1,9
Снижение выхода кокса, % масс.	–	–1,5	–7,7	–7,3	–7,5	–10,3

¹ Термический крекинг

² Термический крекинг в присутствии катализатора

³ Термический крекинг в присутствии образца полиэтилена высокого давления в количестве 2,5 % масс.

⁴ Термический крекинг в присутствии катализатора и образца полиэтилена высокого давления в количестве 2,5 % масс.

⁵ Термический крекинг в присутствии гидрированного легкого газойля каталитического крекинга (фр. 220–260 °С) в количестве 5,0 % масс.

⁶ Термический крекинг в присутствии катализатора и гидрированного легкого газойля каталитического крекинга (фр. 220–260 °С) в количестве 5,0 % масс.

Наибольшая эффективность по выходу светлых фракций и снижению выхода кокса наблюдается при использовании в качестве донора–водорода ГИД ЛГКК (фр. 220–260 °С) в количестве 5,0 % масс. в присутствии образца катализатора.

ВЫВОДЫ

1. Проведено исследование превращения модельного нефтяного сырья в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки в условиях крекинга. Парафиновые углеводороды вступают в реакции крекинга, изомеризации и уплотнения. Нафтенновые углеводороды активно дегидрируются. При наличии доноров–водорода в системе, катализатор способен инициировать реакции трансфера водорода, тем самым гидрируя молекулы предшественников кокса.

2. Исследовано превращение мазута в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки. Наиболее эффективно процесс протекает при размере частиц катализатора 0,5–1,0 мм и его содержании в сырье 0,1 % масс, что при температуре 460 °С позволяет получить выход светлых 51,3 % масс. при приросте в 7,9 % масс., относительно термического крекинга.

3. Проведено исследование превращения гудрона в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки. Большой выход светлых фракций, как и при крекинге мазута, достигнут при использовании катализатора с размером частиц

0,5–1,0 мм и его содержании в сырье 0,1 % масс. При температуре процесса 460 °С выход светлых фракций составил 39,8 % масс., при этом прирост относительно термического крекинга составил 1,1 % масс.

4. Выполнено исследование влияния растворителей–доноров водорода на результаты термического крекинга в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки. Сделан вывод о наибольшей эффективности процесса по выходу светлых фракций и снижению выхода кокса при введении в систему 5 % масс. ГИД ЛГКК (фр. 220–260 °С). При температуре 460 °С выход светлых составил 35,6 % масс., что превышает выход светлых фракций при термическом крекинге на 2,4 % масс. Снижение выхода кокса составило 10,7 % масс.

5. Исследовано совместное превращение гудрона и образцов полимеров (ПВД, ПНД, ПП, БК) в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки. Наибольшая эффективность по выходу светлых фракций при температуре 460 °С достигнута при добавлении 2,5 % масс. ПВД (35,4 % масс.). Данные условия позволили снизить выход кокса на 7,3 % масс. относительно термического крекинга, при увеличении выхода светлых фракций 0,6 % масс.

6. Выполнено сравнение материальных балансов наиболее эффективных процессов крекинга гудрона в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки и доноров–водорода. Добавление 2,5 % масс. ПВД позволяет увеличить выход светлых нефтепродуктов на 0,6 % масс. и снизить выход кокса на 7,3 % масс. Введение в систему 5 % масс. образца ГИД ЛГКК (фр. 220–260 °С) ведет к увеличению выхода светлых фракций на 1,9 % масс. и снижению выхода кокса на 10,3 % масс.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

Статьи в научных изданиях

1. Максимов, Н. М. Сравнительный анализ превращений модельных компонентов тяжелого нефтяного сырья в условиях крекинга в присутствии катализатора металлического и кислотного типов / Н. М. Максимов, А. А. Зурнина, И. С. Докучаев, П. С. Солманов, Ю. В. Еремина, Е. О. Жилкина, В. Б. Коптенармусов, А. А. Пимерзин // *Химия и технология топлив и масел*. – 2020. – № 6(622). – С. 14–18.
2. Докучаев, И. С. Исследование процесса термического крекинга в присутствии регенерированного отработанного катализатора гидроочистки / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // *Российский химический журнал*. – 2022. – Т. 66, № 1. – С. 57–65.
3. Докучаев, И. С. Исследование превращения гудрона в присутствии дисперсных и нефтерастворимых суспендированных катализаторов / И. С. Докучаев, А. А. Зурнина, П. В. Склюев, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // *Российский химический журнал*. – 2023. – Т. 67, № 3. – С. 3–10.
4. Докучаев, И. С. Исследование термического превращения мазута в присутствии регенерированного отработанного катализатора гидроочистки / И. С. Докучаев, А.А. Зурнина, И.И. Занозина, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // *Мир нефтепродуктов*. – 2023. – № 2. – С. 28–36.
5. Докучаев, И. С. Исследование каталитических свойств регенерированного отработанного катализатора гидроочистки в условиях крекинга модельных систем / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // *Международный научно–исследовательский журнал*. – 2024. – № S5(143).
6. Докучаев, И. С. Исследование превращения модельных компонентов нефтяного сырья в условиях крекинга на регенерированном катализаторе гидроочистки / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2024. – Т. 32, № 1. – С. 24–31.
7. Докучаев, И. С. Исследование превращения гудрона в присутствии регенерированного отработанного катализатора гидроочистки / И. С. Докучаев, А. А. Зурнина, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // *Мир нефтепродуктов*. – 2024. – № 3. – С. 34–40.
8. Докучаев, И. С. Превращение гудрона в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки и нефтяных доноров водорода / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов, Э. Т. Шарипова, О.С. Ажищева, В.А. Тыщенко // *Российский химический журнал*. – 2025. – Т. 69, № 3. – С. 99–108.

Труды конференций

1. Зурнина, А. А. Влияние строения алифатического донора водорода на результаты процесса термического крекинга углеводородов тяжелого нефтяного сырья / А. А. Зурнина, И. С. Докучаев, П. С. Солманов, Н. М. Максимов, Ю. В. Еремина, Е. О. Жилкина // В сборнике: XXVIII Международная научно-практическая конференция "Приоритетные направления развития науки и технологий". – 2020. – С. 64–67.
2. Зурнина, А. А. Роль катализатора и донора водорода в процессе термического крекинга углеводородов тяжелого нефтяного сырья / А. А. Зурнина, И. С. Докучаев, П. С. Солманов, Н. М. Максимов, Ю. В. Еремина, Е. О. Жилкина // В сборнике: XXVIII Международная научно-практическая конференция "Приоритетные направления развития науки и технологий". – 2020. – С. 60–63.
3. Докучаев, И. С. Изучение влияния технологических условий на скорость превращения вакуумного газойля в присутствии высокодисперсных суспендированных катализаторов // Дни науки – 2020. 75-я научно-техническая конференция обучающихся СамГТУ. Сборник тезисов лучших докладов обучающихся. – Самара, 2020. – С. 136–137.
4. Докучаев, И. С. Роль катализатора и донора водорода в процессе термического крекинга углеводородов тяжелого нефтяного сырья / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов, П. С. Солманов, А. А. Зурнина, Ю. В. Еремина, Е. О. Жилкина, А. А. Пимерзин // Ломоносов–2021. Материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, секция "Химия". – Москва, 2021. – С. 301.
5. Докучаев, И. С. Влияние термической предобработки катализатора на результаты процесса термического крекинга тяжелого нефтяного сырья / И. С. Докучаев, А. А. Зурнина, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // В сборнике: ТЕХНОЛОГИЯ–2021. – 2021. – С. 24–26.
6. Зурнина, А. А. Роль отработанного промышленного катализатора гидроочистки и донора водорода в процессе термического крекинга углеводородов тяжелого нефтяного сырья / А. А. Зурнина, И. С. Докучаев, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // Булатовские чтения. – 2021. – Т. 2. – С. 74–79.
7. Dokuchaev, I. S. Investigation of the influence of a highly dispersed catalyst on the thermal cracking process / I. S. Dokuchaev, N. M. Maximov, V. A. Tyshchenko // Mendeleev 2021. – Saint Petersburg: St. Petersburg State University, 2021. – P. 377.
8. Докучаев, И. С. Роль катализатора и донора водорода в процессе термического крекинга углеводородов тяжелого нефтяного сырья / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов, П. С. Солманов, А. А. Зурнина, Ю. В. Еремина, Е. О. Жилкина, А. А. Пимерзин // В книге: Роскатализ. Сборник тезисов. – 2021. – С. 706.
9. Докучаев, И. С. Изучение влияния высокодисперсного катализатора на процесс термического крекинга / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов: Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием. – Иваново: ИГХТУ, 2021. – С. 313–316.
10. Докучаев, И. С. Изучение влияния параметров и состава сырья на результаты процесса термического крекинга в присутствии катализатора / И. С. Докучаев, А. А. Зурнина, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // Инновации и "зеленые" технологии : Круглый стол в рамках III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Устойчивое развитие, экоинновации и «зеленые» экономика и технологии». – 2021. – С. 49–50.
11. Докучаев, И. С. Исследование крекинга модельного нефтяного сырья на отработанном катализаторе гидроочистки / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // Теория и практика процессов химической технологии (Марушкинские чтения) : Материалы VI Международной научной конференции, Уфа, 17 ноября 2021 года. – Уфа: УГНТУ, 2021. – С. 181–182.
12. Докучаев, И. С. Исследование крекинга вакуумного газойля в присутствии суспендированного катализатора / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // Перспективы инновационного развития химической технологии и инженерии : II МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ. – Том 7. – Сумгаитский государственный университет, 2021. – С. 150–151.
13. Докучаев, И. С. Сравнительный анализ каталитической активности алюмокобальтмолибденового и природного железомарганцевого катализаторов / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко //

- Перспективы инновационного развития химической технологии и инженерии : II МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ. – Том 7. – Сумгаитский государственный университет, 2021. – С. 150–151.
14. Докучаев, И. С. Исследование превращений модельного нефтяного сырья на отработанном катализаторе гидроочистки / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов // Физика. Технологии. Инновации. ФТИ–2022: Тезисы докладов, Екатеринбург, 16–20 мая 2022 года. – Екатеринбург: УРФУ, 2022. – С. 495–496.
15. Докучаев, И. С. Исследование активности регенерированного катализатора гидроочистки в процессе крекинга вакуумного газойля / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // Булатовские чтения. – 2022. – Т. 2. – С. 74–76.
16. Докучаев, И. С. Сравнение каталитической активности образцов катализаторов термодеструктивной переработки атмосферных остатков перегонки нефти / И. С. Докучаев, А. А. Зурнина, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // Булатовские чтения. – 2022. – Т. 2. – С. 77–80.
17. Докучаев, И. С. Влияние сульфидирования на превращение модельного углеводородного сырья на катализаторе гидроочистки / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов // Техническая химия. От теории к практике: сборник тезисов докладов, Пермь, 05–09 сентября 2022 года. – Пермь: Институт технической химии, 2022. – С. 55.
18. Dokuchaev, I. S. Investigation of the regenerated spent hydrotreating catalyst in the conditions of cracking of model and real oil raw materials / I. S. Dokuchaev, N. M. Maximov // Catalysis: from science to industry : Proceedings of VII International scientific school–conference for young scientists. – Tomsk: National Research Tomsk State University, 2022. – P. 98.
19. Докучаев, И. С. Превращение атмосферных нефтяных остатков в присутствии регенерированного отработанного катализатора гидроочистки / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов // Проблемы науки. Химия, химическая технология и экология: Сборник материалов Всероссийской научно–технической конференции. – Новомосковск – Тула: Аквариус, 2022. – С. 280–284.
20. Докучаев, И. С. Исследование превращения н–додекана в условиях крекинга с использованием регенерированного отработанного катализатора гидроочистки / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов // Актуальные вопросы химической технологии и защиты окружающей среды: Сборник материалов IX Всероссийской конференции, посвященной 55–летию Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова. – Чебоксары: ЧГУ, 2022. – С. 160–161.
21. Докучаев, И. С. Исследование крекинга мазута в присутствии регенерированного отработанного катализатора гидроочистки / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов // Переработка углеводородного сырья: проблемы и инновации–2022: Материалы Международной научно–практической конференции. – Астрахань: АГТУ, 2022. – С. 39–40.
22. Докучаев, И. С. Исследование влияния содержания высокодисперсного катализатора на результаты крекинга мазута / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов // XXVI Всероссийская конференция молодых учёных–химиков (с международным участием). – Нижний Новгород: ННГУ, 2023. – С. 466.
23. Докучаев, И. С. Исследование каталитической активности отработанного регенерированного алюмокобальтмолибденового катализатора гидроочистки / И. С. Докучаев, Г. О. Голиков, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // Труды международной научно–практической конференции "Ауэзовские чтения–21: новый Казахстан – будущее страны". – Чимкент: ЮКУ им. М. Ауэзова, 2023. – Т. 5. – С. 111–114.
24. Докучаев, И. С. Исследование каталитической активности ацетилацетонатов различных металлов в условиях крекинга тяжелого нефтяного сырья / И. С. Докучаев, А. А. Зурнина, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов: Материалы VII Всероссийской научной конференции. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "Бук", 2023. – С. 189–191.
25. Докучаев, И. С. Исследование влияния степени дисперсности регенерированного отработанного катализатора гидроочистки на результаты крекинга мазута / И. С. Докучаев, А. В. Волобуев, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов: Материалы VII Всероссийской научной конференции. – Казань: Общество с ограниченной

ответственностью "Бук", 2023. – С. 147–149.

26. Докучаев, И. С. Превращение вакуумных нефтяных фракций в процессе термического крекинга в присутствии катализатора / И. С. Докучаев, А. А. Зурнина, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // Инновации и "зелёные" технологии в газохимии и нефтепереработке : Всероссийский научно–практический семинар: сборник материалов и докладов. – Самара: Государственное бюджетное учреждение культуры "Самарская областная универсальная научная библиотека", 2023. – С. 35–37.
27. Докучаев И.С., Зурнина А.А., Максимов Н.М., Тыщенко В.А. Исследование превращения гудрона в присутствии алюмокобальтмолибденовых катализаторов. Инновации и "зелёные" технологии : IV Всероссийская научно–практическая конференция: сборник материалов и докладов, Самара, 09 ноября 2023 года. – Самара: Самарская областная универсальная научная библиотека, 2024. С. 65–68.
28. Докучаев, И. С. Исследование превращения гудрона в присутствии суспендированных катализаторов / И. С. Докучаев, А. А. Зурнина, Г. О. Голиков, Ю. В. Еремина, Н. М. Максимов // Тезисы докладов V Всероссийской научной конференции «Переработка углеводородного сырья. Комплексные решения» (ЛЕВИНТЕРСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2023). – Самара, 2023. – С. 66–68.
29. Докучаев, И. С. Исследование превращения гудрона в присутствии нефтерастворимых катализаторов / И. С. Докучаев, А. А. Зурнина, А. В. Волобуев, Ю. В. Еремина, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // Тезисы докладов V Всероссийской научной конференции «Переработка углеводородного сырья. Комплексные решения» (ЛЕВИНТЕРСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2023). – Самара, 2023. – С. 81–83.
30. Докучаев, И. С. Крекинг гудрона в присутствии регенерированного отработанного катализатора гидроочистки и доноров водорода / И. С. Докучаев, О. С. Ажищева, Э. Т. Шарипова, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // Тезисы «XXVIII Всероссийской конференции молодых учёных–химиков (с международным участием)». – 2025.
31. Докучаев, И. С. Исследование влияния водорода на результаты крекинга гудрона в присутствии отработанного регенерированного катализатора гидроочистки / И. С. Докучаев, Н. М. Максимов, Г. О. Голиков, В. А. Тыщенко // Тезисы V Российского конгресса по катализу «РОСКАТАЛИЗ». – 2025.
32. Максимов, Н. М. Исследование превращения гудрона в присутствии регенерированного отработанного катализатора гидроочистки / Н. М. Максимов, И. С. Докучаев, А. В. Волобуев, В. А. Тыщенко // Тезисы V Российского конгресса по катализу «РОСКАТАЛИЗ». – 2025.
33. Докучаев, И. С. Термический крекинг гудрона в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки и доноров водорода / И. С. Докучаев, Э. Т. Шарипова, О. С. Ажищева, Н. М. Максимов, В. А. Тыщенко // Тезисы докладов VII Российской конференции «Актуальные проблемы нефтехимии» (с международным участием). – Пятигорск, 2025. – С. 584–586.
34. Тыщенко, В. А. Исследование совместного крекинга гудрона и отходов полимерной промышленности / В. А. Тыщенко, И. С. Докучаев, А. Л. Селянин, О. С. Ажищева, Н. М. Максимов // Тезисы докладов VII Российской конференции «Актуальные проблемы нефтехимии» (с международным участием). – Пятигорск, 2025. – С. 639–641.
35. Максимов, Н. М. Исследование влияния фракционного состава растворителя–донора водорода на результаты крекинга гудрона / Н. М. Максимов, И. С. Докучаев, Э. Т. Шарипова, А. Л. Селянин, В. А. Тыщенко // Тезисы докладов VII Российской конференции «Актуальные проблемы нефтехимии» (с международным участием). – Пятигорск, 2025. – С. 645–647.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.03

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

(протокол № 15 от 23 декабря 2025 г.)

Заказ № XX Тираж 110 экз.

Формат 60x84/16. Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» Отдел типографии и оперативной печати

443100 г. Самара ул. Молодогвардейская, 244