

На правах рукописи



**Луганский Артур Игоревич**

**Основы технологии иницированного  
крекинга гудрона**

05.17.04. Технология органических веществ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Москва 2015 год**

Работа выполнена на кафедре технологии основного органического и нефтехимического синтеза федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Научный руководитель: доктор химических наук, доцент  
Козловский Роман Анатольевич,  
профессор кафедры технологии основного органического и нефтехимического синтеза  
ФГБОУ ВПО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Косивцов Юрий Юрьевич,  
профессор кафедры Биотехнологии и химии  
ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет»  
кандидат химических наук,  
Кадиева Малкан Хусаиновна,  
старший научный сотрудник лаборатории №2: «Химии нефти и нефтехимического синтеза» ФГБУН «Институт нефтехимического синтеза РАН им. А.В. Топчиева»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина»

Защита состоится «24» сентября 2015 г. в 11.00 на заседании диссертационного совета Д 212.204.02 при Российском химико-технологическом университете имени Д. И. Менделеева (125047 г. Москва, Миусская пл., д. 9) в аудитории 443 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Автореферат диссертации разослан \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.204.02



Староверов Д.В.

**Актуальность темы.** В настоящее время из всего объема перерабатываемой в России нефти (289 млн. тонн в 2014 году) только около 40% перерабатывается в моторное топливо (бензин и дизельное топливо), при этом образуется значительное количество тяжелых нефтяных остатков (гудрон, мазут, вакуумный газойль). Несмотря на то, что с 2011 года инвестиции в модернизацию нефтеперерабатывающих мощностей увеличились в 3 раза, глубина переработки нефти в России выросла всего лишь на 1,5% с 70,9 до 72,4%.

Внедрение термokatалитических и гидрокаталитических процессов переработки тяжелых нефтяных остатков осложняется из-за их высокой стоимости, капиталоемкости и энергоемкости. В свою очередь термические процессы переработки тяжелых нефтяных остатков характеризуются низкими капитальными и эксплуатационными затратами, но недостатком этих процессов является невысокий (не более 20-40%) выход светлых фракций углеводородов (бензин и дизельное топливо).

Таким образом, разработка способа инициирования термических процессов с целью повышения их производительности и выхода топливных фракций при получении в качестве остатка востребованных товарных продуктов (различные марки котельного топлива и битума), является актуальной задачей.

Работа выполнялась в целях реализации проекта RFMEFI57714X0107 в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы».

**Цель работы.** Разработка основ эффективной технологии инициированной кислородом воздуха термической конверсии гудрона.

**Задачи исследования.** 1. Исследование иницирующего воздействия кислорода воздуха при термической конверсии гудрона в периодических условиях. 2. Исследование влияния основных параметров (температура, время пребывания, количество инициатора) на процесс крекинга гудрона в непрерывных условиях. 3. Определение оптимальных параметров процесса инициированного крекинга с целью получения максимального количества топливных фракций при одновременном получении остатка, соответствующего требованиям на топочный мазут или дорожный битум. 4. Разработка технологической схемы и проведение оценочного расчета реакционного узла промышленной установки инициированного крекинга мощностью 100.000 тонн в год.

**Научная новизна.** 1. Установлены основные закономерности иницирующего воздействия кислорода воздуха на термический крекинг гудрона, позволяющие

оптимизировать процесс. 2. Выбран наиболее эффективный способ подачи воздуха – непосредственно в реактор крекинга, при температурах процесса. 3. Определены оптимальные условия иницированного крекинга гудрона в непрерывных условиях.

**Практическая значимость.** Разработаны основы новой технологии переработки гудрона в топливные фракции и дорожный битум или топочный мазут, методом иницированного кислородом воздуха крекинга. Разработанная технология является гибкой и позволяет перерабатывать гудрон в целевые продукты, исходя из сезонных потребностей.

**Апробация работы.** Основные материалы, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на международных конференциях: I Санкт-Петербургский международный форум «Инновационные технологии в области получения и применения горючих и смазочных материалов», г. Санкт-Петербург, Россия, 2013; «Chemreactor-21» г. Делфт, Нидерланды, 2014.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 статей, 6 из которых в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, выдано 3 патента.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы, содержащего 110 источников. Работа изложена на 134 страницах машинописного текста, включает 44 рисунка, 48 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** представлен литературный обзор, в котором рассматриваются основные промышленные способы термической переработки тяжелых нефтяных остатков, которые направлены на получение целевых остаточных продуктов (топочный мазут, различные марки битума и кокса).

Сравнительный анализ различных способов термической и термокаталитической переработки тяжелых нефтяных остатков показывает наличие ряда существенных недостатков, в основном экономического характера, которые мешают их внедрению в промышленность. Так, для проведения процесса гидровисбрекинга необходимо значительное количество водорода. Проведение процессов плазмохимического крекинга, иницирования сырья воздействием электромагнитного поля, кавитации и ультразвука связано с серьезными затратами на дополнительное генерирующее оборудование. Введение гетерогенных инициаторов (торф, сланец) требует затрат на добычу, транспортировку и подготовку значительного количества (до 30%) компонента. Использование озона и различных добавок на его основе сопряжено с высокими затратами на генерацию самого инициатора.

Использование воздуха, в качестве инициатора, с экономической точки зрения представляется наиболее эффективным ввиду его доступности и не сложной

предварительной подготовки. Однако, обработка исходного сырья воздухом и использование полученной окисленной добавки в качестве инициатора, является малоэффективным способом активации процесса термической конверсии нефтяных остатков, ввиду потери иницирующего действия при нагреве сырья до температуры крекинга, за счет распада образовавшихся на стадии окисления пероксидов.

Исходя из этого, было принято решение об исследовании иницированного крекинга кислородом воздуха при его подаче непосредственно в реактор при температуре проведения процесса крекинга. Этот способ подачи инициатора позволит максимально эффективно организовать его использование и компенсировать энергетические затраты на реакции крекинга.

**Во второй главе** приведены сведения об используемом в работе сырье; описаны схемы периодической и непрерывной лабораторных установок; представлены методики проведения экспериментов и анализа продуктов процесса крекинга.

**В третьей главе** представлены результаты исследований процесса крекинга в периодическом реакторе. В начале, было изучено влияние температуры крекинга гудрона на показатели процесса в отсутствие инициатора (Рисунок 1).

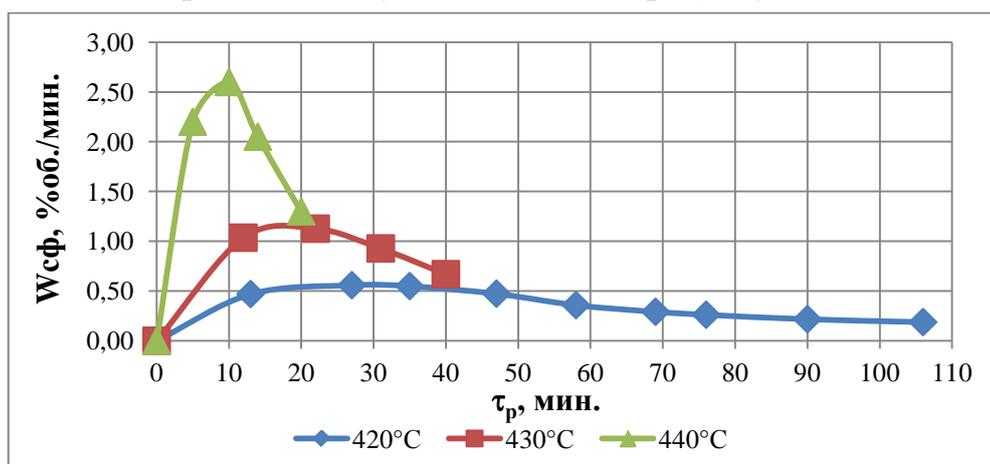


Рис.1. Зависимость скорости образования светлых фракций от времени реакции. где:  $W_{сф}$  - скорость образования светлых фракций, % об./мин., – отношение изменения объемного выхода ( $\Delta V_{сф}$ ) светлой фракции, к периоду времени ( $\Delta \tau_p$ ) в течение которого данная фракция была отобрана

Из полученной зависимости видно, что для всех экспериментов, выполненных в интервале температуры 420–440<sup>0</sup>С, скорость образования светлых фракций и, соответственно, скорость крекинга проходит через максимум.

Также была проведена серия экспериментов по исследованию влияния глубины отбора светлых фракций ( $G_{сф}$  – отношение массы полученной светлой фракции к массе исходного гудрона) на вязкость остатка при температуре крекинга 430<sup>0</sup>С (таблица 1).

Таблица 1.

Условная вязкость остатков термического крекинга без инициирования при температуре 430<sup>0</sup>С.

$\tau_p$ , мин	$G_{сф}$ , % масс.	Вязкость условная, <sup>0</sup> ВУ
0	0,0	139,9
10	8,7	32,6
14	12,0	34,0
32	26,4	87,8
40	31,2	153,5
45	34,9	632,7

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при невысоких степенях превращения гудрона (выходе светлых фракций) сначала (до  $G_{сф} = 10\%$  масс.) наблюдается снижение вязкости тяжелого остатка, а затем (до 30% масс.) её плавный рост. После этого наблюдается значительное увеличение вязкости получаемых тяжелых остатков (рисунок 2).

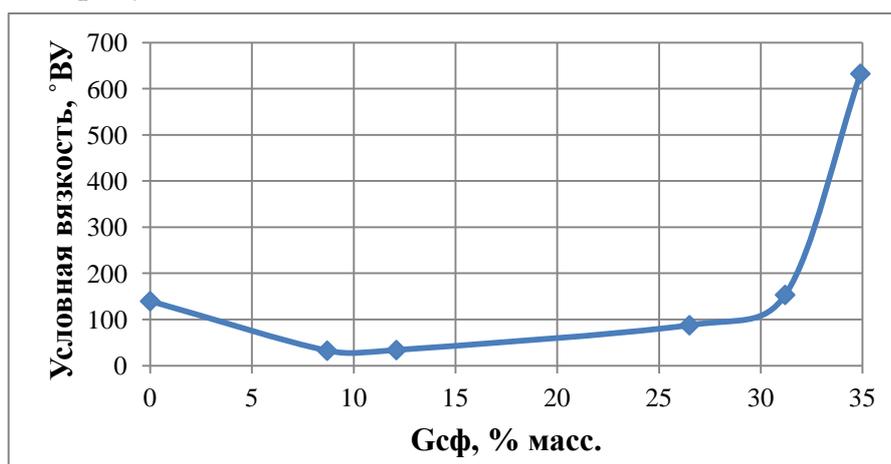


Рис. 2. Изменение вязкости остатка крекинга в зависимости от выхода светлых фракций.

Далее исследовалось влияние температуры и количества инициатора (кислорода воздуха) на выход светлых фракций углеводородов.

Была проведена серия экспериментов при фиксированной скорости подачи воздуха - 3 л/(кг сырья\*мин) и температурах 420<sup>0</sup>С, 430<sup>0</sup>С и 440<sup>0</sup>С. Полученные результаты сравнивались с экспериментами без инициатора.

Так, при температуре 420<sup>0</sup>С скорость образования светлых фракций при иницированном крекинге по сравнению с термическим крекингом увеличивается на 10–15%, время реакции около 100 мин; при температуре 430<sup>0</sup>С скорость возрастает уже на 30–40%, время реакции 25–30 мин; при температуре 440<sup>0</sup>С скорость возрастает на 50-60%, время реакции составляет 10–15 мин (рисунок 3).

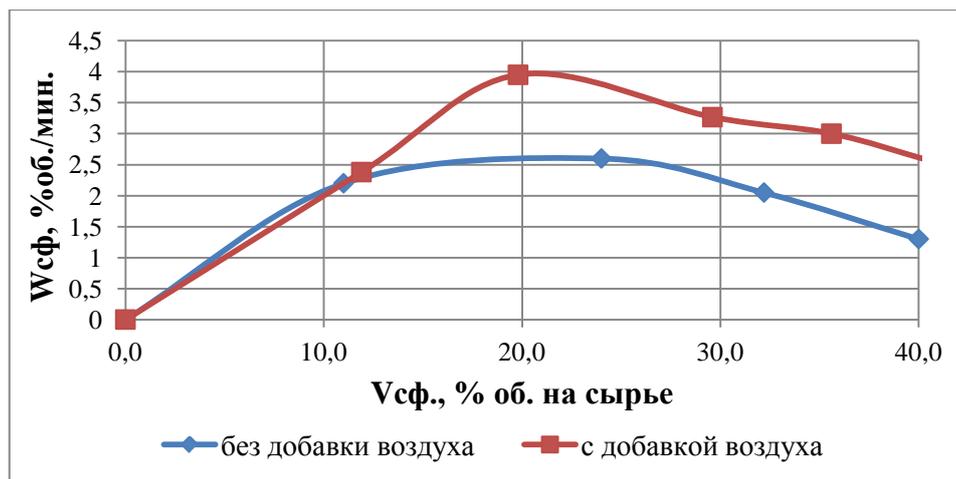


Рис. 3. Зависимость скорости образования светлых фракций от их объемного выхода с воздухом и без воздуха, при температуре 440<sup>0</sup>С.

С целью определения оптимального количества инициатора – кислорода воздуха, была выполнена серия экспериментов при варьировании скорости подачи воздуха в реактор в интервале от 2,0 до 4,0 л/(кг сырья\*мин). Температура процесса 440<sup>0</sup>С.

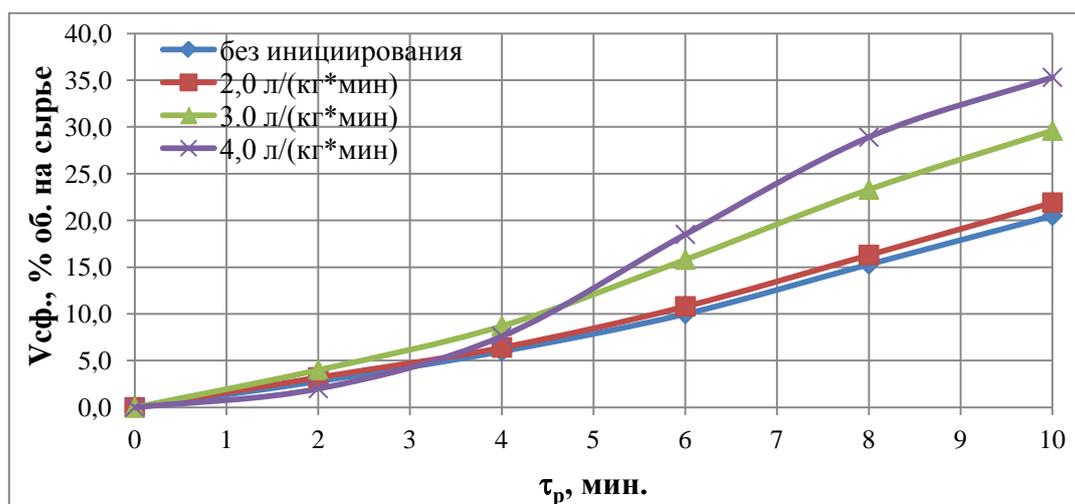


Рис. 4. Зависимость выхода светлых фракций от времени пребывания сырья при различной скорости подачи воздуха. Температура 440<sup>0</sup>С.

Из зависимости, представленной на рисунке 4, следует, что с увеличением количества подаваемого воздуха при одинаковом времени процесса крекинга выход светлых фракций возрастает на 15% абс. (или более 70% относ.).

Более наглядно иницирующее действие кислорода воздуха наблюдается при анализе зависимости скорости отбора светлых фракций от времени при различной скорости подачи воздуха (рисунок 5), где скорость отбора более чем в 2 раза превосходит скорость отбора светлых фракций термического крекинга (без подачи воздуха).

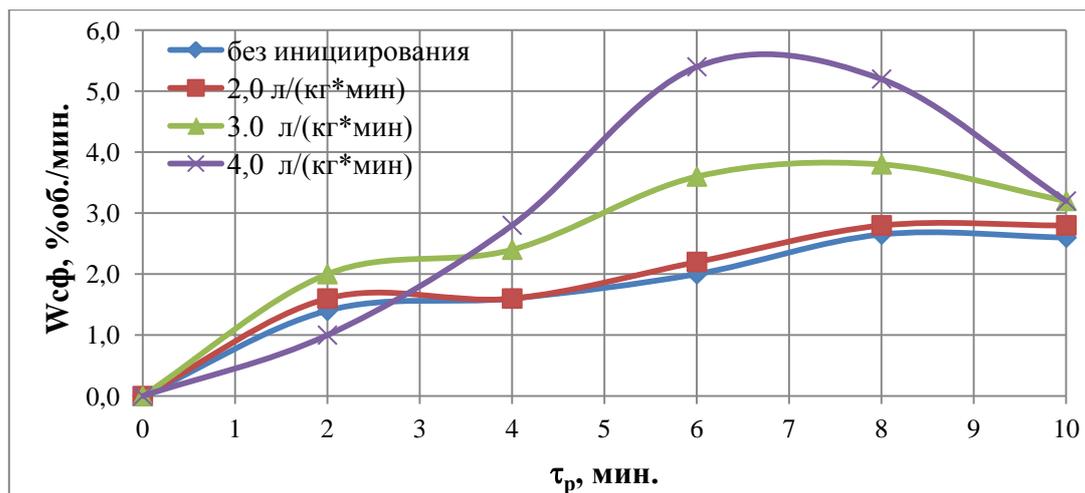


Рис. 5. Зависимость скорости отбора светлых фракций от времени при различном количестве поданного воздуха. Температура – 440<sup>0</sup>С.

Для доведения полученных остатков крекинга до требуемых по ГОСТу 10585-99 показателей вязкости на котельное топливо марки М-100 применялся метод компаундирования, с использованием полученных в процессе светлых фракций. Материальный баланс иницированного и неиницированного крекинга представлен в таблице 2.

Таблица 2.

Сопоставительный анализ процессов крекинга с вводом воздуха и контрольного эксперимента с последующим компаундированием.

	Термический	Иницированный
Время крекинга, мин.	20	14
Расход воздуха л/(кг сырья*мин)	-	3,0
Выход газообразных продуктов	3,6	4,0
Выход светлых фракций (фракция н.к.÷360 <sup>0</sup> С), % масс.	34,0	34,6
Выход тяжелого остатка	62,4	61,4
Количество светлых фракций, необходимое для разбавления тяжелого остатка до требования ГОСТ на мазут М-100, % масс.	28,0	18,6
Материальный баланс, % масс.		
Газ	3,6	4,0
Бензиновая фракция (н.к.÷180 <sup>0</sup> С)	6,0	7,1
Дизельная фракция (180-280 <sup>0</sup> С)	-	8,9
Газойль (фракция 280-360 <sup>0</sup> С)	-	-
Котельное топливо марки М-100	90,4	80,0

Таким образом, при использовании воздуха в качестве инициатора термической конверсии гудрона в периодических условиях дополнительно можно получить до 10% абс. топливных фракций с температурой кипения до 280<sup>0</sup>С.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования процесса иницированного крекинга в проточной системе.

Первая серия экспериментов проводилась с целью определения оптимальной концентрации инициатора (кислорода воздуха), количество которого варьировалось от 1 до 3% от массы подаваемого сырья, температура процесса 450<sup>0</sup>С, время пребывания сырья в реакторе 10 минут. Критерием для оценки оптимальной концентрации инициатора является вязкость получаемого остатка.

Результаты представлены в таблице 3 и на рисунке 6.

Таблица 3.

Условия и результаты экспериментов при варьировании количества воздуха, подаваемого в реактор. Температура – 450<sup>0</sup>С. Время пребывания сырья – 10 мин. Расход гудрона - 45 г/мин.

<b>Условия проведения экспериментов</b>				
Расход воздуха, л/кг сырья,	38	56	76	89
в т.ч. кислорода, л/кг сырья	8	12	16	19
Доля кислорода на сырье, % масс.	1,1	1,6	2,2	2,7
<b>Материальный баланс</b>				
Взято, % масс. (относительно суммы гудрона и кислорода).				
Гудрон	98,9	98,4	97,8	97,3
Воздух,	4,5	6,6	8,9	10,9
в т.ч. Кислород	1,1	1,6	2,2	2,7
Азот	3,4	5,0	6,7	8,2
Итого:	103,4	105,0	106,7	108,2
Получено, % масс. (относительно суммы гудрона и кислорода).				
Азот	3,4	5,0	6,7	8,2
Газообразные продукты	3,9	3,7	3,7	3,8
Вода	0,6	1,2	1,4	1,6
Фракция н.к. ÷ 350 <sup>0</sup> С,	16,7	23,1	25,1	26,1
в т.ч. фракция н.к. ÷ 200 <sup>0</sup> С	2,9	3,7	3,9	4,0
фракция 200–350 <sup>0</sup> С	13,8	19,4	21,2	22,1
Фракция >350 <sup>0</sup> С (остаток)	78,8	72	69,8	68,5
Итого:	103,4	105,0	106,7	108,2
<b>Характеристика полученных продуктов</b>				
Вязкость кинематическая фракции >350 <sup>0</sup> С при 100 <sup>0</sup> С, мм <sup>2</sup> /с	575,9	662,5	709,4	878,5

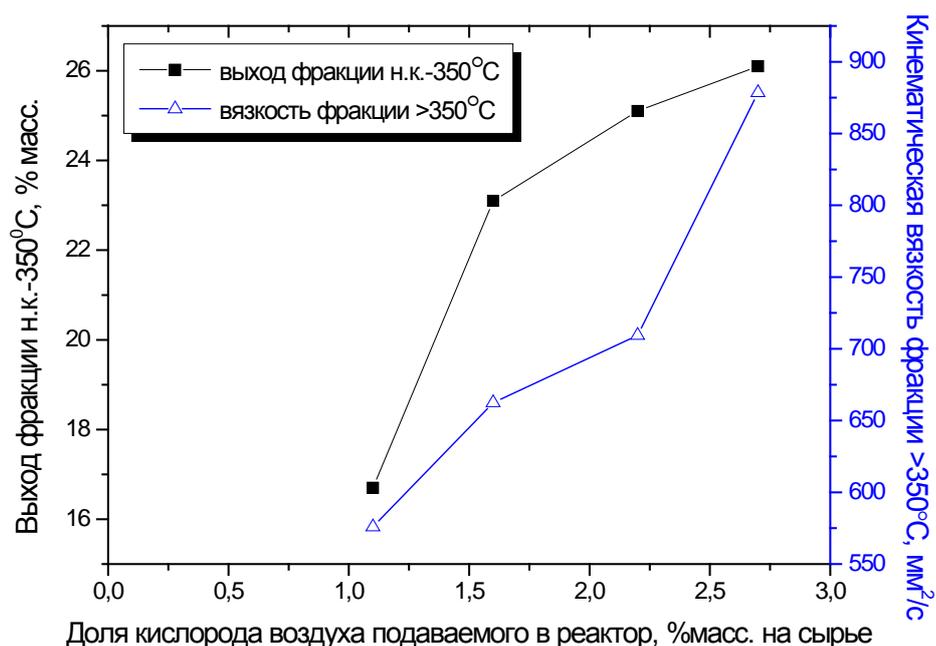


Рис. 6. Зависимость выхода фракции н.к.  $\div 350^{\circ}\text{C}$  и вязкости фракции  $>350^{\circ}\text{C}$  от концентрации кислорода воздуха в реакторе.

При увеличении количества подаваемого в реактор воздуха рост выхода фракции н.к.  $\div 350^{\circ}\text{C}$  замедляется. Существенное возрастание вязкости остатка (фракция  $>350^{\circ}\text{C}$ ) наблюдается в интервале, соответствующем выходу светлых фракций 23-25% масс., что соответствует содержанию кислорода на взятое сырьё, приблизительно равное 1,5-2,0% масс. (или воздуха 6-8%). Поэтому дальнейшие исследования проводили в этом диапазоне концентрации кислорода.

После определения оптимального интервала концентрации кислорода воздуха были проведены серии экспериментов при варьировании температуры процесса и времени пребывания сырья в реакторе.

Результаты проведенных экспериментов представлены на рисунках 7 и 8.

Из представленных зависимостей видно, что с ростом температуры и времени пребывания сырья в реакторе выход светлых фракций увеличивается. При этом данные зависимости имеют сходный характер при различных условиях проведения процесса. Таким образом, для достижения высоких значений выхода светлых фракций и производительности, процесс необходимо проводить при максимально возможных температурах, времени контакта и содержании кислорода.

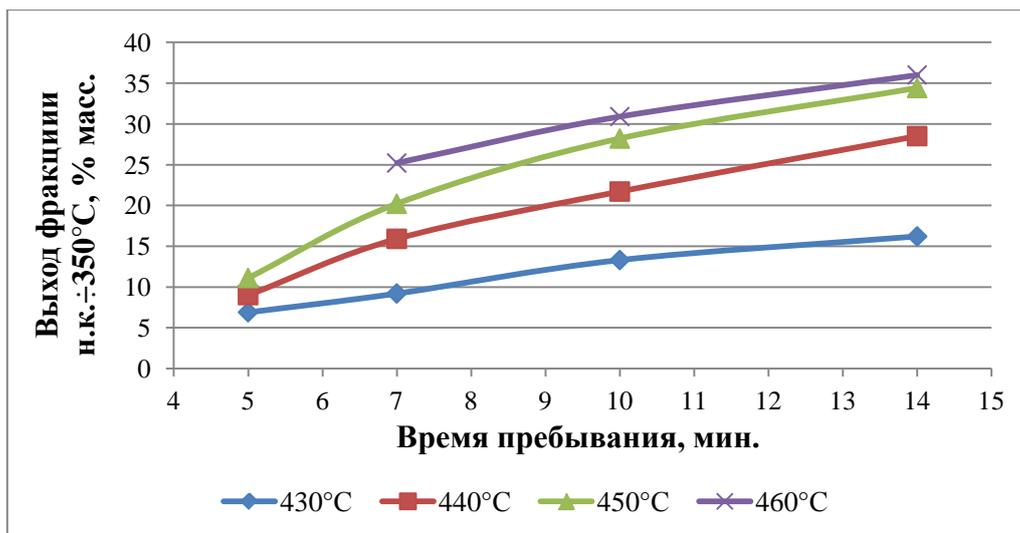


Рис. 7. Зависимость выхода фракции н.к. ÷ 350<sup>0</sup>С от времени пребывания сырья в реакторе при различных температурах проведения процесса крекинга.

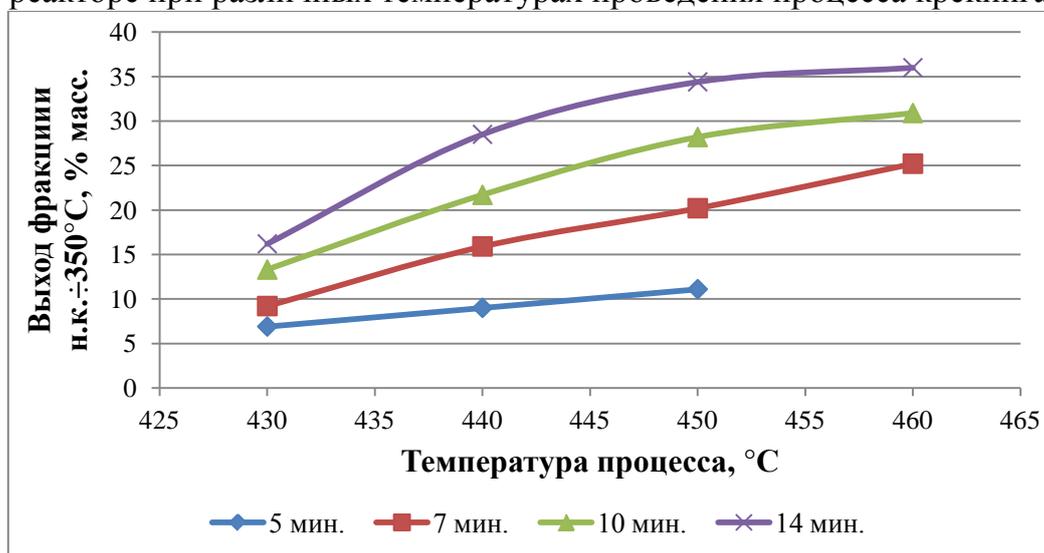


Рис. 8. Зависимость выхода фракции н.к. ÷ 350<sup>0</sup>С от температуры крекинга при различном времени пребывания сырья в реакторе.

Однако, при этом возникают проблемы, связанные с применением оставшегося после крекинга тяжелого остатка, количество которого может достигать 55-80% от взятого на переработку гудрона. Поэтому следующей задачей был подбор таких условий процесса, которые обеспечивают одновременное достижение приемлемого выхода светлых фракций, а в качестве тяжелых остатков – получение продуктов, которые могут быть использованы как котельное топливо, либо как дорожный битум.

В ходе исследования характеристик остатков инициированного крекинга были установлены оптимальные условия для получения максимального выхода топливных фракций и котельного топлива (таблица 4). При этом, использование метода компаундирования позволяет получать топливные фракции облегченного фракционного состава.

Таблица 4.

Условия и материальный баланс процессов термоокислительного крекинга гудрона при получении светлых фракций и котельного топлива (мазут М100).

Условия проведения процесса		
Температура процесса, °С	440	450
Время пребывания сырья в реакторе, мин.	7	10
Расход гудрона, г/мин	70	50
Расход воздуха, л/кг сырья,	61	50
в т.ч. кислорода, л/кг сырья	13	10,5
Доля кислорода на сырье, % масс.	1,8	1,5
Материальный баланс		
Взято, % масс. (относительно суммы гудрона и кислорода).		
Гудрон	98,2	98,5
Воздух	7,2	6,0
в т.ч. Кислород	1,8	1,5
Азот	5,4	4,5
Итого:	105,4	104,5
Получено, % масс. (относительно суммы гудрона и кислорода).		
Азот	5,4	4,5
Газообразные продукты	3,2	4,3
Вода	1,4	1,5
Бензиновая фракция (н.к. ÷ 200 <sup>0</sup> С)	2,0	4,5
Дизельная фракция	13,9 (до 350 <sup>0</sup> С)	10,5 (до 280 <sup>0</sup> С)
Мазут М-100	79,5 (>350 <sup>0</sup> С)	79,1 (>280 <sup>0</sup> С)
Итого:	105,4	104,5

Полученные остатки соответствуют требованию ГОСТ на топочный мазут марки М-100 (таблица 5).

Таблица 5.

Физико-химические характеристики остатков иницированного крекинга.

Наименование показателя	Мазут М100	Фракция >350 <sup>0</sup> С	Фракция >280 <sup>0</sup> С
Вязкость условная при 80 <sup>0</sup> С, градусы ВУ	16	15,5	15,0
Вязкость кинематическая при 100 <sup>0</sup> С, мм <sup>2</sup> /с	50	50	48
Массовая доля механических примесей, % масс.	1,0	0,2	0,1
Массовая доля серы (для мазута вида VI), % масс.	3,0	2,95	2,55
Температура вспышки в открытом тигле, °С	110	240	155

Еще одним направлением использования остатков иницированного крекинга может быть получение дорожного битума. Это особенно важно в связи с сезонностью спроса на остаточные топлива.

В ходе исследования характеристик остатков иницированного крекинга было установлено оптимальное время пребывания сырья (14 минут) при получении

максимального выхода топливных фракций и дорожного битума. Результаты, полученные при температурах 440<sup>0</sup>С, 450<sup>0</sup>С и 460<sup>0</sup>С представлены в таблице 6.

Таблица 6.

Условия и материальный баланс процессов термоокислительного крекинга гудрона при получении светлых фракций и дорожного битума с результатами анализа тяжелого остатка крекинга в сравнении с дорожным битумом марки БНД 60/90. Время пребывания – 14 мин. Расход гудрона - 35 г/мин.

<b>Условия проведения экспериментов</b>				
Температура процесса, <sup>0</sup> С	440	450	460	
Расход воздуха, л/кг сырья,	86	50	50	
в т.ч. кислорода, л/кг сырья	18	10,5	10,5	
Доля воздуха (кислорода) на сырье, % масс.	2,5	1,5	1,5	
<b>Материальный баланс</b>				
Взято, % масс. (относительно суммы гудрона и кислорода).				
Гудрон	97,5	98,5	98,5	
Воздух	10,0	6,0	6,0	
в т. ч. Кислород	2,5	1,5	1,5	
Азот	7,5	4,5	4,5	
Итого:	107,5	104,5	104,5	
Получено, % масс. (относительно суммы гудрона и кислорода).				
Азот	7,5	4,5	4,5	
Газообразные продукты	5,0	5,4	4,6	
Вода	1,9	1,5	1,7	
Фракция н.к. ÷ 350 <sup>0</sup> С, в т. ч.	<b>28,5</b>	<b>34,4</b>	<b>36,0</b>	
фракция н.к. ÷ 200 <sup>0</sup> С	4,2	5,7	6,6	
фракция 200–350 <sup>0</sup> С	24,3	28,7	29,4	
Фракция >350 <sup>0</sup> С (остаток)	64,6	58,8	60,7	
Итого:	107,5	104,5	104,5	
	БНД 60/90	Физико-химические характеристики фракции >350 <sup>0</sup> С		
Глубина проникания иглы, 0,1 мм				
при 25 <sup>0</sup> С	60-90	86	84	63
при 0 <sup>0</sup> С, не менее	20	22	21	19
Температура размягчения по кольцу и шару, <sup>0</sup> С, не ниже	47	52	53	54
Растяжимость, см, не менее				
при 25 <sup>0</sup> С	55	>100	>100	70
при 0 <sup>0</sup> С	3,5	4,5	3,8	1,5
Температура хрупкости, <sup>0</sup> С, не выше	-15	-16	-15	-11
Изменение температуры размягчения после прогрева, <sup>0</sup> С, не более	5	5	5	8
Индекс пенетрации	-1,0 ÷ +1,0	0,7	0,9	0,3

Представленные в таблице 6 результаты анализа свидетельствуют о том, что повышение температуры негативно сказывается на качестве получаемого остатка, для использования его как дорожного битума. Так при увеличении температуры процесса выше 450<sup>0</sup>С происходит значительное снижение пенетрации с 84 до 63 пунктов. Низкотемпературные характеристики битума - дуктильность при 0<sup>0</sup>С и температура хрупкости падают до значений ниже допустимых для дорожного битума БНД 60/90. Также, после исследования по ускоренному старению, на 8<sup>0</sup>С понижается температура размягчения, что негативно скажется на дорожном покрытии в ходе эксплуатации.

Таким образом, получить дорожный битум марки БНД 60/90 иницированным крекингом гудрона, возможно при температуре 450<sup>0</sup>С, времени пребывания 14 минут и концентрации кислорода 1,5%. При этом выход фракции <350<sup>0</sup>С достигает 35% масс.

Полученные при этом дистиллятные фракции характеризуются высоким содержанием серы и непредельных углеводородов и требуют гидроочистки. Также, фракции н.к.÷80<sup>0</sup>С и 80–180<sup>0</sup>С содержат достаточно большое количество линейных парафинов, что негативно сказывается на их октановом числе, поэтому эти фракции должны быть вовлечены в процессы изомеризации и риформинга. Фракция 180-350<sup>0</sup>С, после гидроочистки может применяться в качестве компонента дизельного топлива.

**В пятой главе** приведен сравнительный анализ расчетов материального и теплового баланса установок иницированного крекинга в режиме получения котельного топлива и дорожного битума, а также установки висбрекинга. Расчеты проведены для установок производительностью 100 тыс. тонн в год по сырью. Схема промышленной установки представлена на рисунке 9.

В ходе расчета теплового баланса было установлено, что использование воздуха в качестве инициатора процесса термического крекинга гудрона позволяет не только увеличить выход топливных фракций, но и за счет экзотермического эффекта реакций окисления сырья, компенсировать более 25% тепловых расходов на реакцию крекинга.

Была проведена оценка экономического преимущества процесса иницированного крекинга гудрона. Дополнительные затраты на строительство установки иницированного крекинга (по сравнению с установкой висбрекинга) будут связаны с организацией узла подготовки воздуха для подачи в реактор и изменениями в ректификационной колонне, связанные с перераспределением материальных потоков после крекинга. Эти затраты, по нашим оценкам, не будут

превышать 15% от общих капитальных затрат на строительство установки висбрекинга, и при расчете экономической эффективности ими можно пренебречь. Также, предлагается проводить модернизацию действующих установок висбрекинга.

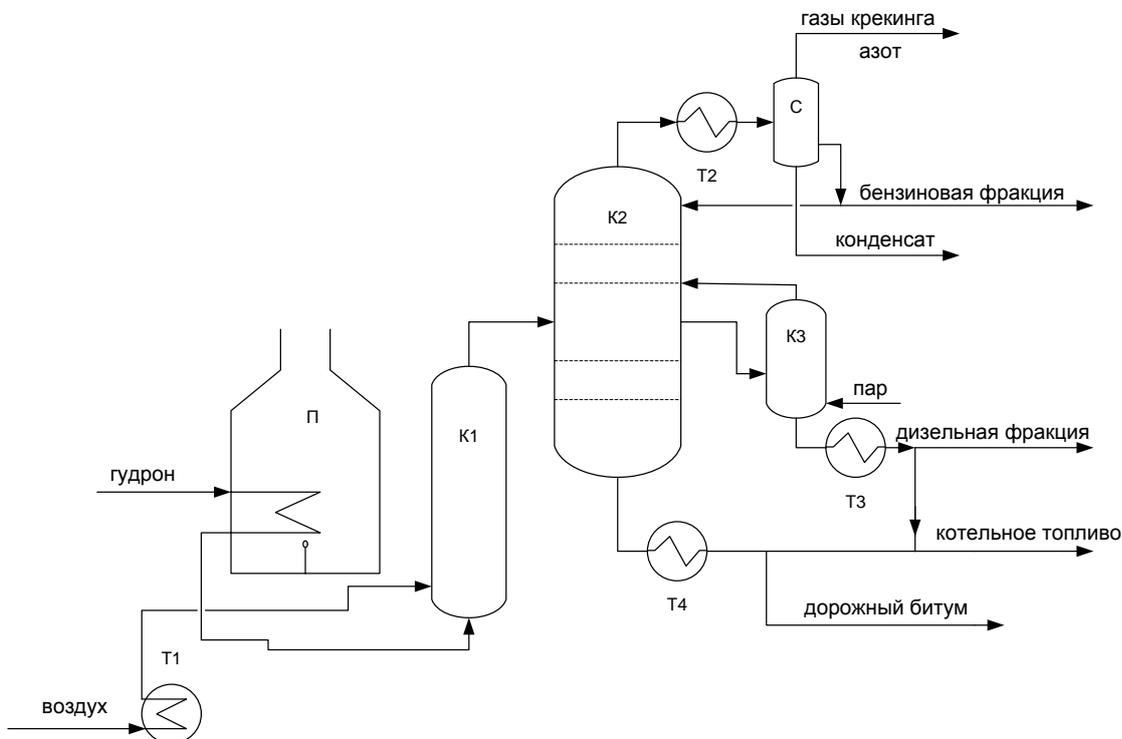


Рис. 9. Технологическая схема процесса иницированного крекинга.  
 П - печь нагрева сырья, К1 – реакционная камера процесса крекинга,  
 К2 – ректификационная колонна, К3 – отпарная колонна, С – сепаратор,  
 Т1-4 - теплообменники

Экономический эффект от внедрения процесса иницированного крекинга гудрона будет достигаться за счет получения дополнительного количества топливных фракций, имеющих более высокую стоимость, по сравнению с остаточными топливами и битумом.

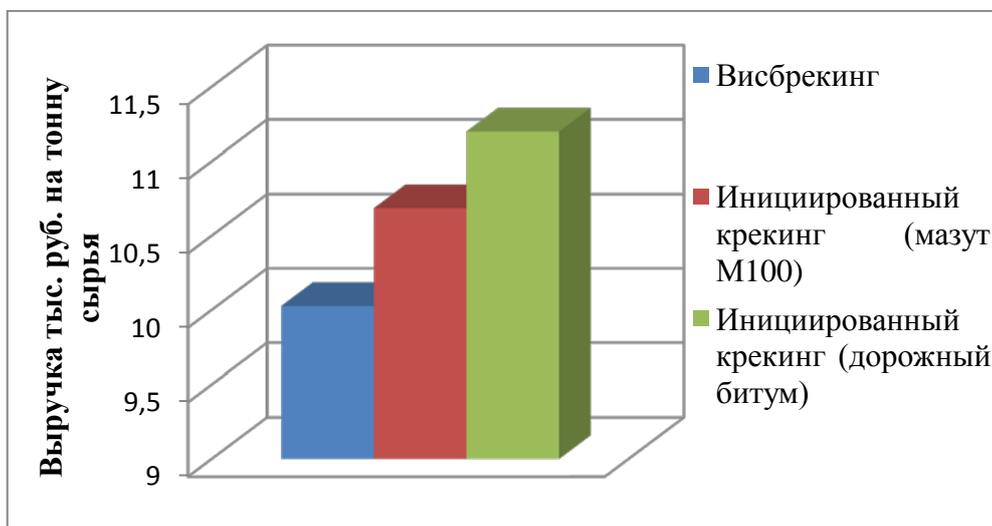


Рис. 10. Удельная выручка (тыс. рублей) на тонну сырья.

Сравнение выручки при реализации продуктов инициированного крекинга и висбрекинга представлены на рисунке 10.

Как видно из диаграммы, выручка на тонну сырья увеличивается при переработке гудрона методом инициированного крекинга на 7% при получении котельного топлива и на 12% при получении дорожного битума, по сравнению с висбрекингом.

## **ВЫВОДЫ**

1. Разработаны основы новой технологии переработки гудрона в моторные фракции и дорожный битум марки БНД60/90 или топочный мазут марки М100 – инициированный кислородом воздуха термический крекинг.

2. Создана стендовая установка непрерывного действия мощностью от 2 до 6 л/ч по сырью для исследования процессов инициированного крекинга тяжелых нефтяных остатков.

3. Определены оптимальные условия инициированного крекинга при одновременном получении моторных фракций и дорожного битума марки БНД60/90 или топочного мазута марки М100 в непрерывной установке.

4. Предложена принципиальная технологическая схема промышленной установки инициированного кислородом воздуха крекинга гудрона.

5. Дана оценка экономического эффекта от внедрения инициированного крекинга гудрона в промышленность на примере установки мощностью 100 тыс. тонн в год по сырью.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

1. Галиев Р.Г., Луганский А.И., Третьяков В.Ф., Мороз И.В., Ермаков А.Н. Инициирование процесса термокрекинга тяжелых нефтяных остатков кислородом воздуха // Мир нефтепродуктов. 2007. № 8. С. 16–19.

2. Галиев Р.Г., Луганский А.И., Третьяков В.Ф., Мороз И.В., Ермаков А.Н. О новом подходе к углублению переработки тяжелых нефтяных остатков // Нефть Газ – Экспозиция. 2007. 22 (42). С. 26-28.

3. Галиев Р.Г., Луганский А.И., Третьяков В.Ф., Мороз И.В., Французова Н.А., Ермаков А.Н. Механизм инициирования термокрекинга гудрона кислородом воздуха // Вестник МИТХТ. 2008. Т. 3. № 4. С. 17-22.

4. Галиев Р.Г., Луганский А.И., Мороз И.В., Ермаков А.Н. Обоснование механизма активирования термокрекинга гудрона кислородом воздуха // Мир нефтепродуктов. 2008. № 7. С. 16 – 19.
5. Галиев Р.Г., Луганский А.И., Мороз И.В., Ермаков А.Н. Технология переработки тяжелых нефтяных остатков при температурах 430-450<sup>0</sup>С без применения водорода // Мир нефтепродуктов. 2009. № 7-8. С. 49 – 51.
6. Галиев Р.Г., Луганский А.И., Третьяков В.Ф., Французова Н.А., Ермаков А.Н. Крекинг гудрона при иницировании кислородом воздуха // Технологии нефти и газа. 2009. №3. С. 37-43.
7. Бех Н.И., Луганский А.И., Мороз И.В., Ермаков А.Н. Технология переработки тяжелых нефтяных остатков без применения водорода // Химическая техника. 2010. № 3. С. 34-37.
8. Способ получения битума: пат. 2427606 РФ, МПК: С10С3/04, С08L95/00, С10G27/00 // Демьянов С.В., Гольдберг Ю.М., Ермаков А.Н., Мороз И.В., Луганский А.И., Заявка: 2010111416/05; 26.03.2010, опубл. 27.08.2011.
9. Швец В.Ф., Сучков Ю.П., Ханикян В.Л., Луганский А.И., Горбунов А.В., Ермаков А.Н. Термоокислительный крекинг гудрона. Исследование процесса в проточном реакторе // Химическая промышленность сегодня. 2012. №12. С. 6-15.
10. Швец В.Ф., Макаров М.Г., Луганский А.И., Горбунов А.В., Сучков Ю.П., Староверов Д.В., Дигуров Н.Г., Ермаков А.Н. Математическая модель термоокислительного крекинга гудрона // Химическая промышленность сегодня. 2012. № 7. С. 51-53.
11. Способ термоокислительного крекинга тяжелых нефтяных остатков: пат. 2458967 РФ, МПК: С10G9/36 // Демьянов С.В., Гольдберг Ю.М., Швец В.Ф., Ермаков А.Н., Луганский А.И., Ханикян В.Л., Козловский Р.А., Корнеев И.С. Заявка: 2011113391/04, 07.04.2011, опубл. 20.08.2012.
12. Швец В.Ф., Сучков Ю.П., Козловский Р.А., Луганский А.И., Горбунов А.В. Термоокислительный крекинг мазута. Исследование процесса в проточном реакторе // Химическая промышленность сегодня. 2013. № 10. С.19-25.
13. Способ термоокислительного крекинга тяжелых нефтяных остатков: пат. 2502785 РФ, МПК: С10G9/00, С10G9/36 // Швец В.Ф., Козловский Р.А., Луганский А.И., Гольдберг Ю.М., Демьянов С.В., Ермаков А.Н., Сучков Ю.П., Горбунов А.В. Заявка: 2012113975/04, 11.04.2012, опубл. 27.12.2013.
14. Сучков Ю.П., Козловский Р.А., Швец В.Ф., Горбунов А.В., Луганский А.И. Способ термоокислительного крекинга тяжелых нефтяных остатков // Бутлеровские сообщения. 2014. Т. 37. № 2. С. 60-65.

15. Швец В.Ф., Луганский А.И. Термоокислительный крекинг тяжелых нефтяных остатков // I Санкт-Петербургский международный форум "Инновационные технологии в области получения и применения горючих и смазочных материалов", Санкт-Петербург (24-25 сентября 2013 г.); Сб. тр. форума. С.-Пб.: «Международная Академия Прикладных Исследований», 2013. С. 399-404.
16. Luganskiy A., Gorbunov A., Ushin N., Kozlovskiy R., Shvets V., Suchkov Y. Thermo-oxidizing cracking (TOC) of heavy oil residues // XXI International Conference on Chemical Reactors CHEMREACTOR-21, Delft, September 22–25, 2014, PP-63, P.274.