

ВЛИЯНИЕ ГИДРОКРЕКИНГА ГУДРОНА НА ПОСЛЕДУЮЩИЙ ПРОЦЕСС ЕГО КОКСОВАНИЯ

© 2022 г. В. В. Чесноков^{1,*}, П. П. Дик¹, А. С. Чичкань^{1,**}, В. Н. Пармон¹

¹Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

*E-mail: chesn@catalysis.ru

**E-mail: AlexCsh@yandex.ru

Поступила в редакцию 1 апреля 2022 г.

После доработки 2 сентября 2022 г.

Принята к публикации 11 ноября 2022 г.

Исследован процесс термического коксования гудрона и коксования в присутствии катализатора Ni/сибунит при температурах 450–600°C. Показано, что добавка катализатора Ni/сибунит к гудрону приводит к незначительному увеличению выхода кокса. Выделяющиеся при коксовании гудрона серосодержащие соединения взаимодействуют с металлическим никелем с образованием сульфида никеля, что приводит к быстрой дезактивации катализатора в реакции образования углерода по механизму «карбидного цикла». Для уменьшения дезактивации катализатора 8%Ni/сибунит под действием серосодержащих соединений в ходе коксования, предварительно был проведен гидрокрекинг гудрона в проточном реакторе с неподвижным слоем сульфидированного катализатора Ni–Mo/Al₂O₃ в среде водорода (давление 16.0 МПа, температура 420°C, объемная скорость подачи гудрона 0.5 ч⁻¹, соотношение водород/сырье 2000 об/об). Показано, что гидрокрекинг гудрона приводит к существенному снижению содержания серы и азота в жидких продуктах. В присутствии катализатора 8%Ni/сибунит коксование жидких продуктов гидрокрекинга гудрона приводит к увеличению выхода кокса по сравнению с его выходом при термическом коксовании. При каталитическом коксовании наблюдается изменение морфологии углерода. На катализаторе 8%Ni/сибунит происходит образование углеродных нановолокон, диаметр которых находится в диапазоне 15–40 нм. Помимо углеродных нановолокон наблюдается образование пластинок аморфного углерода.

Ключевые слова: гудрон, гидрокрекинг, коксование, углеродные нановолокна, никелевые катализаторы

DOI: 10.31857/S0028242122060168, **EDN:** NRHEYC

Истощение запасов традиционной нефти и наличие нефтяных остатков, таких как гудрон, ставят перед исследователями задачу поиска более перспективных способов их переработки в ценные продукты [1–4]. Существуют различные подходы к переработке гудрона. Наиболее широко распространен способ замедленного коксования [5, 6], при котором происходит образование углеводородных газов, жидких продуктов низкого качества (с высоким содержанием олефинов, гетероатомных и ароматических соединений) и нефтяного кокса. Во всем мире нефтяной кокс используется для производства анодов для алюминиевой промышленно-

сти и графитированных электродов для плавления электросталей [7].

В настоящее время общепринятым механизмом процесса коксования нефтяных остатков считается «консекутивная схема», представляющая собой ряд последовательных стадий образования «мономеров уплотнения» и промежуточных продуктов уплотнения вплоть до графитовой структуры на основе реакций конденсации, полимеризации, дегидроциклизации, связывания ароматических колец и обеднения водородом [8–10]. Одним из направлений совершенствования технологии глубокой переработки тяжелых углеводородных нефтяных остат-

ков методом коксования является использование каталитических добавок, которые могут влиять как на выход, так и на свойства получающегося углерода. Образование углеродных наноматериалов, каталитические методы получения которых интенсивно развиваются в последние годы, происходит по механизму «карбидного цикла» [11–13], который существенно отличается от консекутивного. Механизм «карбидного цикла» реализуется на металлах подгруппы железа (железо, кобальт, никель) и включает в себя каталитическое разложение углеводорода на поверхности одной стороны металлической наночастицы, диффузию атомов углерода через объем наночастицы и образование атомов углерода на другой стороне. Наибольшей активностью в образовании углеродных наноструктур обладает металлический никель.

В работах [14, 15] было показано, что гетерогенные катализаторы на основе металлов подгруппы железа проявляют активность при пиролизе тяжелых углеводородов и тем самым могут быть инструментом управления процессами коксования. Кроме того, известно, что никель- и кобальт-содержащие катализаторы широко используются в процессах обессеривания нефтяных продуктов. В работе [16] было показано, что коксование смеси 8%Ni/сибунит–гудрон не приводит к образованию каталитического углерода. Было высказано предположение, что основная причина, по которой не происходит образования каталитического углерода, – наличие серосодержащих углеводородов в составе гудрона. Кроме того, высокомолекулярные углеводороды мало активны в реакции каталитического образования углерода по механизму карбидного цикла. В частности, было установлено [14], что реакционная способность парафиновых углеводородов уменьшается в следующем порядке: гексан > ундекан > гексадекан.

Поэтому в настоящей статье нами была предпринята попытка одновременно решить эти проблемы с помощью проведения процесса гидрокрекинга гудрона, так как известно [17], что гидрокрекинг вакуумного газойля позволяет значительно снизить содержание гетероатомных примесей (S и N) в получающихся продуктах. Повышенный выход легких фракций достигается при гидрогенизационном превращении вакуумного газойля, что обуславли-

вает перспективность данного подхода не только к переработке вакуумного газойля [18], но и гудрона.

Цель данной работы – исследование влияния предварительного гидрокрекинга гудрона (ГГ) с целью снижения содержания в нем серы на процесс его последующего коксования. Особое внимание будет сосредоточено на влиянии трансформации состава гудрона после гидрокрекинга на морфологию образующегося углерода.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Методика каталитического коксования гудрона

В работе [14] были синтезированы катализаторы составов 1–10%Ni/сибунит. Было показано, что при концентрации 8% никеля в катализаторе образуются металлические частицы оптимального размера для роста углеродных нановолокон (УНВ). Поэтому в настоящей работе использовали катализатор 8%Ni/сибунит.

Процесс коксования проводили в автоклаве объемом 300 мл при температурах 450–600°C и давлении 5–10 атм. Более подробное описание конструкции автоклава приведено в работе [19]. В корзинку для образца загружали навеску гудрона массой около 16 г без катализатора или с катализатором (1.0 г). Автоклав помещали в печь, нагревали до требуемой температуры реакции и выдерживали в течение 2 ч.

Методика, по которой рассчитывали выход кокса без учета содержания катализатора 8%Ni/сибунит, состояла в следующем: после проведения опыта по коксованию гудрона с добавкой катализатора определяли количество образовавшегося композита «кокс–катализатор»; затем из этого количества вычитали массу катализатора 8%Ni/сибунит, добавленного к гудрону.

В экспериментах по коксованию использовали гудрон Омского НПЗ или весь жидкий продукт его гидрокрекинга, полученный в проточном реакторе с неподвижным слоем сульфидированного катализатора Ni–Mo/Al₂O₃ в среде водорода при давлении 16.0 МПа, температуре 420°C, объемной скорости подачи гудрона 0.5 ч⁻¹ и соотношении водород/сырье 2000 об/об. Элементный состав исходного гудрона представлен на рис. 1.

Анализ получающихся продуктов

Определение элементного состава жидкой и твердой фазы осуществляли на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL Perform'X. Для возбуждения флуоресцентного излучения использовали рентгеновскую трубку с анодом из родия (Rh).

Процентное (в мас. %) содержание элементов оценивали с помощью программы для нестандартного анализа UniQuant. Порошкообразной образец предварительно измельчали до гомогенного мелкодисперсного состояния в агатовой ступке. При анализе как порошкообразного, так и жидкого (вязкого) образца навеску помещали в кассету для анализа жидкостей и порошков.

Концентрацию серы и соотношение H : C в исходном гудроне и продуктах его переработки определяли с помощью CHNS-O-анализатора VARIO EL CUBE (система Elementar Analysen). Содержание серы в сырье и продуктах определяли в соответствии со стандартом ASTM D4294. Содержание серы в исходном гудроне составляло 1.5 мас. %. Фракционный состав гудрона и образующихся из него продуктов определяли методом имитации перегонки на газовом хроматографе Agilent 7890В по ASTM D7169.

В ходе реакции в газообразных продуктах реакции определяли содержание серосодержащих компонентов. Анализ компонентов газовой фазы проводили на хроматографе Кристалл-2000М («Хроматек», Россия). Для анализа H_2S , CO_2 , SO_2 , CO_2 и CH_4 применяли пламенно-фотометрический детектор (ПФД). Компоненты газовой смеси разделяли на насадочной колонке (уголь СКТ, 2 мм × 1.5 м) при концентрациях 0.5–5 мас. % и на насадочной колонке, заполненной твердым носителем (Hayesep Q + 0.9% PTMSP, 2 мм × 3 м) при концентрациях менее 0.5 мас. %.

Двумерная газовая хроматография. Для анализа состава жидких продуктов, получающихся после гидрокрекинга гудрона, использовали современный метод двумерной газовой хроматографии (ГХ*ГХ). Этот метод позволяет анализировать сложные смеси углеводородов до C_{50} . Все анализы методом ГХ*ГХ были выполнены с использованием хроматографа Agilent 7890В и автосамплера G4513А. В ГХ*ГХ-экспериментах был использован потоковый модулятор Agilent и программное

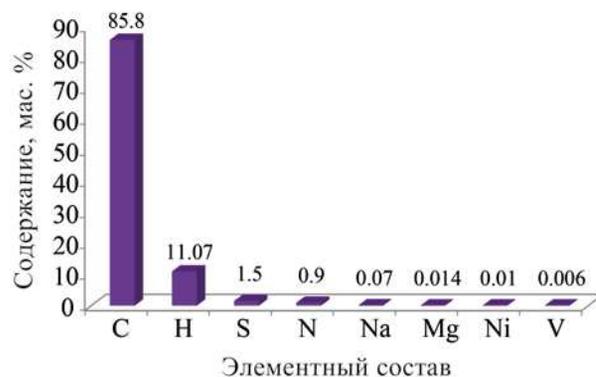


Рис. 1. Элементный состав исследуемого гудрона КТ 1/1, мас. %.

обеспечение GC IMAGE (для визуализации двумерных образов) [20].

Рентгенофазовый анализ. Фазовый состав образцов был исследован с помощью рентгенофазового анализа. Дифракционные данные были получены на дифрактометре ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific, Швейцария) с использованием излучения CuK_{α} с длиной волны 1.54184 Å сканированием по точкам. Фазовый анализ проводили с использованием баз дифракционных (PC-PDF) и структурных (ICSD) данных. Расчет размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) проводили, используя интегральную ширину пиков по формуле Селякова–Шеррера

Электронная микроскопия. Снимки просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМВР) получали на электронном микроскопе JEM-2010 (JEOL, Япония) с разрешением по решетке 0.14 нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из направлений совершенствования технологии глубокой переработки тяжелых углеводородных нефтяных остатков методом коксования является использование каталитических добавок, существенно влияющих на выход легких дистиллятных фракций. В связи с этим исследовано влияние добавки катализатора 8%Ni/сибунит на процесс коксования гудрона.

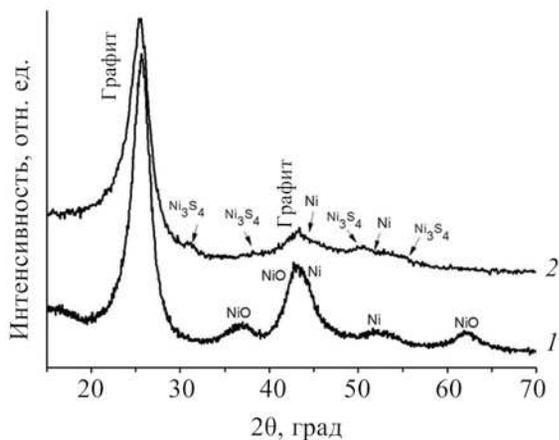


Рис. 2. Дифрактограммы образцов катализатора 8%Ni/сибунит: после восстановления (1) и после каталитического коксования гудрона (2). Условия коксования: 450°C, 2 ч.

Изучение восстановленного катализатора 8%Ni/сибунит

Предварительно катализатор 8%Ni/сибунит восстанавливали в потоке водорода при температуре 400°C в течение часа. На рис. 2 представлены две рентгенограммы этого катализатора: после восстановления и после каталитического коксования.

На дифрактограмме образца восстановленного катализатора 8%Ni/сибунит присутствует пик, характеризующий графитоподобную фазу, с положением 25.6° по 2θ. Этот максимум значительно сдвинут в сторону меньших углов по сравнению с его положением в идеальном графите (даже с учетом влияния факторов Лоренца, поляризации и поглощения, которые приводят к смещению широких максимумов в начале дифрактограммы в сторону меньших углов), что говорит о сильной разупорядоченности носителя. Размер области когерентного рассеяния (ОКР) носителя во всех случаях порядка 4 нм. На рентгенограмме присутствуют также

Таблица 1. Дифракционные характеристики металлического никеля и его оксида в восстановленном катализаторе Ni/сибунит

Фаза	Параметр элементарной ячейки
Ni	$a = 3.523$
NiO	$a = 4.177$

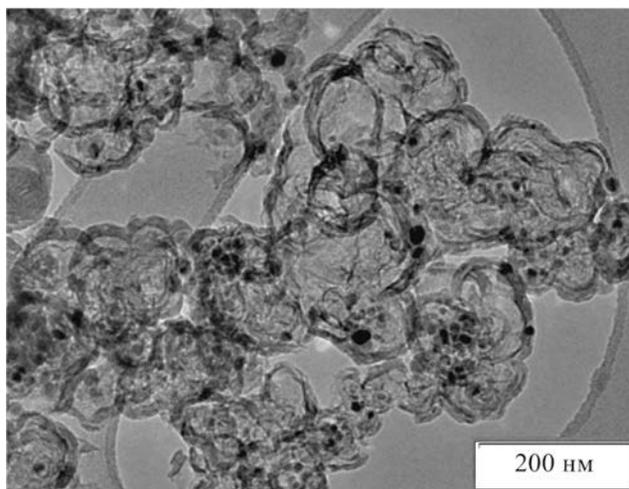


Рис. 3. Электронно-микроскопический снимок катализатора 8%Ni/сибунит.

пики, принадлежащие фазам металлического никеля и его оксиду (рис. 2). Оксид никеля(II) присутствует в составе катализатора, т.к. поверхностный слой частиц металлического никеля окисляется кислородом воздуха. Дифракционные характеристики металлического никеля и его оксида представлены в табл. 1.

На рис. 3 представлен электронно-микроскопический снимок катализатора 8%Ni/сибунит. Сибунит имеет вид скорлупок, состоящих из углерода, внутри которых находятся частицы никеля размером 5–20 нм.

Каталитическое коксование гудрона

В состав гудрона был введен катализатор 8%Ni/сибунит для получения дополнительного количества кокса. Катализатор составлял 6.3 мас. % от массы гудрона. При введении в состав гудрона катализатора Ni/сибунит в газообразных продуктах коксования заметно увеличивается концентрация водорода. Например, при проведении процесса коксования при 450°C концентрация водорода увеличивается с 20 до 31 об. %. Из этого можно сделать вывод, что катализатор вносит дополнительный вклад в образование водорода. На металлическом никеле углеводороды распадаются на углерод и водород по механизму карбидного цикла. Образующееся дополнительное количество

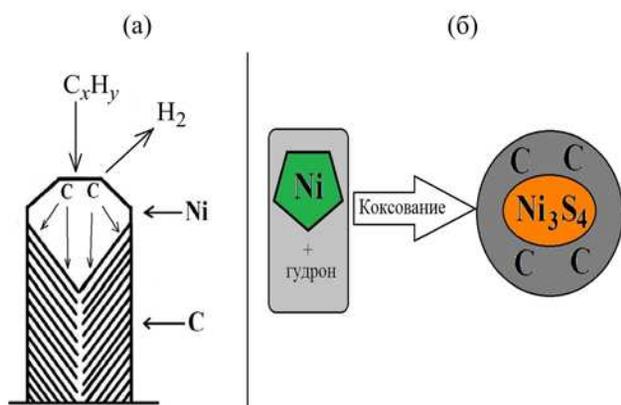


Рис. 4. Схематические модели роста углеродных нановолокон на металлическом никеле из C_1 – C_4 -углеводородов (а) и дезактивации процесса роста в результате сульфидирования металла (б).

углерода в основном блокирует поверхность наночастиц сульфида никеля.

На рис. 4 представлена известная модель роста углеродных нановолокон из C_1 – C_4 -углеводородов на металлическом никеле. Углеводород разлагается на передней стороне металлической наночастицы на атомы углерода и водорода (рис. 4а). Атомы водорода рекомбинируют с образованием молекулярного водорода, который десорбируется в газовую фазу, а атомы углерода диффундируют через объем металлического никеля и наращивают тело углеродного нановолокна.

Однако в продуктах коксования не наблюдается образования углеродных наноструктур (углеродные нановолокна или углеродные нанотрубки). В составе гудрона содержится 1.5 мас. % серы, что приводит к образованию сероводорода и серооксида углерода (COS) в газообразных продуктах кок-

сования. Серосодержащие соединения взаимодействуют с металлическим никелем с образованием сульфида никеля. Сульфидирование металлического никеля приводит к дезактивации процесса роста углеродных нановолокон, так как делает невозможным диффузию атомов углерода через объем каталитической частицы (рис. 4б). На сульфидированных частицах происходит отложение тонкой углеродной пленки.

Сульфидирование никелевых частиц, показанное на рис. 2, подтверждается данными рентгенофазового анализа. На дифрактограмме видно, что металлический никель под действием серосодержащих соединений переходит в сульфид никеля Ni_3S_4 . Для того, чтобы уменьшить дезактивацию катализатора 8%Ni/сибунит под действием серосодержащих соединений, мы провели гидрокрекинг гудрона перед его коксованием.

Влияние гидрокрекинга гудрона на последующее каталитическое коксование

Гидрокрекинг гудрона проводили в проточном реакторе с неподвижным слоем сульфидированного катализатора Ni–Mo/ Al_2O_3 в среде водорода при давлении 16.0 МПа, температуре 420°C. Обнаружено, что гидрокрекинг гудрона приводит к существенному снижению содержания серы в продуктах реакции с 1.5 мас. % до 0.1 мас. %, т.е. больше, чем на порядок. Содержание азота при этом уменьшается с 0.90 мас. % до 0.07 мас. %.

После гидрокрекинга существенно меняется фракционный состав гудрона (табл. 2). Значительно снижается содержание высококипящих фракций.

Для анализа состава жидких продуктов, получающихся после гидрокрекинга гудрона, исполь-

Таблица 2. Фракционный состав исходного гудрона и жидкого продукта после его гидрокрекинга

Фракция	Температура, °С	Фракционный состав, мас. %	
		исходный гудрон	жидкий продукт
Бензин	25–180	0	0.2
Дизель	180–360	0.1	17.0
Вакуумный газойль	360–550	10.0	38.7
Вакуумный остаток	550–720	53.7	20.1
Неэлюируемый остаток	>720	36.2	24.0

Таблица 3. Структурно-групповой состав жидких продуктов после гидрокрекинга гудрона (по данным хроматографии), мас. %

Компонент	Бензин	Дизель	Вакуумный газойль	Вакуумный остаток
<i>n</i> -Алканы	1.0	6.8	8.0	4.2
Циклоалканы	0.7	4.6	11.8	3.9
Изоалканы	2.1	10.7	13.0	13.3
Алкены	0.3	6.8	2.3	0
Моноароматические соединения	0.3	6.9	2.1	0
Диароматические соединения	0	0.5	0.1	0
Триароматические соединения	0	0.3	0.3	0

зовали описанный выше метод двумерной газовой хроматографии (ГХ*ГХ). В табл. 3 по данным хроматографии представлен структурно-групповой состав жидких продуктов после гидрокрекинга гудрона.

Следует отметить низкое содержание ароматических углеводородов и олефинов в жидких продуктах гидрокрекинга гудрона.

Коксование жидкого продукта гидрокрекинга гудрона

Далее в работе проведено коксование всего жидкого продукта гидрокрекинга (ЖПГ) гудрона в присутствии катализатора 8%Ni/сибунит. Коксование проводили в автоклаве при температуре 600°C в течение 2 ч. При коксовании ЖПГ гудрона наблюдается уменьшение выхода кокса по сравнению с выходом нефтяного кокса из исходного гудрона благодаря гидрированию ненасыщенных углеводородов (табл. 4). Как известно, ненасыщенные

углеводороды обладают более высокой коксогенностью.

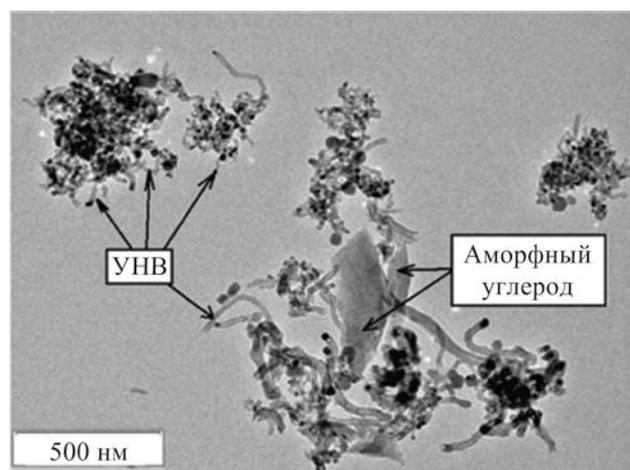
Проведено исследование морфологии и структуры углеродных отложений, образовавшихся из ЖПГ гудрона на 8%Ni/сибунит катализаторе. На рис. 5 представлен электронно-микроскопический снимок углеродных отложений, образовавшихся из ЖПГ гудрона на 8%Ni/сибунит катализаторе при температуре 600°C.

Диаметр углеродных нановолокон варьируется в диапазоне 15–40 нм. Помимо, углеродных нановолокон наблюдается образование пластинок аморфного углерода. Вероятно, коксование наиболее высокомолекулярных углеводородов по-прежнему

Таблица 4. Влияние сырья и катализатора 8% Ni/сибунит на выход кокса при температуре коксования, 600°C

Исходная загрузка в реактор для коксования	Выход кокса, мас. %
Гудрон	19
Гудрон–8%Ni/сибунит	21*
ЖПГ	10
ЖПГ–8%Ni/сибунит	13*

* – без учета содержания катализатора 8% Ni/сибунит в получающемся коксе.

**Рис. 5.** Электронно-микроскопический снимок углеродных нановолокон и пластинок аморфного углерода, образовавшихся на катализаторе 8%Ni/сибунит при коксовании жидкого продукта гидрокрекинга гудрона при 600°C.

идет по консеквативному механизму с образованием крупных пластин аморфного углерода.

ВЫВОДЫ

Исследован процесс коксования гудрона при температурах 450–600°C. Добавка катализатора Ni/сибунит к гудрону приводит к незначительному увеличению выхода кокса. Катализатор дает дополнительный вклад в образование кокса. На металлическом никеле углеводороды распадаются на углерод и водород по механизму карбидного цикла. Однако выделяющиеся при коксовании гудрона серосодержащие соединения взаимодействуют с металлическим никелем с образованием сульфида никеля, что приводит к быстрой дезактивации катализатора в реакции образования углерода по механизму «карбидного цикла».

Для того, чтобы уменьшить дезактивацию катализатора 8%Ni/сибунит под действием серосодержащих соединений, мы провели гидрокрекинг гудрона. Гидрокрекинг гудрона приводит к существенному снижению содержания серы и азота в ЖПГ гудрона. В присутствии катализатора 8%Ni/сибунит коксование ЖПГ гудрона приводит к увеличению выхода кокса по сравнению выходом кокса при термическом коксовании жидких продуктов гидрокрекинга. Установлено, что гидрокрекинг гудрона приводит к изменению морфологии образовавшегося углерода в процессе коксования. Наблюдается образование углеродных нановолокон, диаметр которых варьируется в диапазоне 15–40 нм. Помимо, углеродных нановолокон наблюдается образование пластинок аморфного углерода. Коксование наиболее высокомолекулярных углеводородов по-прежнему идет по консеквативному механизму с образованием крупных пластин аморфного углерода.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда – проект № 17-73-30032.

КОНФЛИКТОВ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чесноков В.В., д.х.н., вед. науч. сотрудник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5837-2278>

Дик П.П., к.х.н., научный сотрудник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9100-5135>

Чичкань А.С., к.т.н., науч. сотрудник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2112-0776>

Пармон В.Н., академик, науч. руководитель ИК СО РАН, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8877-7388>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gwyn J.E.* Oil from shale as a viable replacement of depleted crude reserves: processes and challenges // *Fuel Processing Technology*. V. 70. Issue 1. April 2001, P. 27–40. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(00\)00150-8](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(00)00150-8)
2. *Dyni J. R.* Survey of Energy Resources. Ed. by Clarke A.W. and Trinnaman J.A. London : World Energy Council, 2010. 93 p.
3. *Сурков В.Г., Певнева Г.С., Головки А.Г.* Структурные и химические превращения асфальтенов и смол гудрона в условиях механического воздействия // *Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт*. 2015. № 12. С. 6–10.
4. *Applied industrial catalysis*. Ed. Ruiz, J.C.S. New York: Arcler Press. 2017, 254 p.
5. *Капустин В.М., Гуреев А.А.* Технология переработки нефти. Часть 2 Деструктивные процессы. М.: КолосС, 2007. 334 с.
6. *Гэри Дж.Х., Хэндверк Г.Е., Кайзер М.Дж.* Технологии и экономика нефтепереработки. СПб.: ЦОП «Профессия», 2013. 440 с. [*Gary J.H., Handwerk G.E., Kaiser M.J.* Oil Refining: Technology and Econo»ics. 5th ed. New York: CRS Press. 2007].
7. *Кондрашева Н.К., Рудко, В.А., Назаренко М.Ю.* Влияние давления процесса коксования гудрона и асфальта на физико-химические свойства и структуру нефтяных коксов // *Кокс и химия*. 2018. Т. 61. № 12. С. 26–31 [*Kondrasheva N.K., Rudko V.A., Nazarenko M.Yu.* Influence of pressure in the coking of heavy oil tar and asphalt on the coke properties and structure // *Coke and Chemistry*. 2018. V. 61. № 12. P. 483–488. <https://doi.org/10.3103/S1068364X18120049>].
8. *Левинтер М.Е., Медведева М. И., Панченков Г.М., Агапов Г.И.* Кинетика образования кокса при крекинге групповых компонентов нефтяных остатков // *Химия и технология топлив и масел*. 1966. № 11. С. 25–27.

9. Руденко А.П. Современные проблемы физической химии. М.: Изд-во МГУ, 1968. Т. 3. 263 с.
10. Буянов Р.А. Закоксование катализаторов. Новосибирск: Наука. 1983. 207 с. С. 16–28.
11. Чесноков В.В., Буянов Р.А. Образование углеродных нитей при каталитическом разложении углеводородов на металлах подгруппы железа и их сплавах // Успехи химии. 2000. Т. 69. № 7. С. 675–692. [Chesnokov V.V., Buyanov R.A. The Formation of carbon filaments upon decomposition of hydrocarbons catalysed by iron subgroup metals and their alloys // Russian Chemical Reviews. 2000. V. 69. № 7. P. 623–638. <https://doi.org/10.1070/RC2000v069n07ABEH000540>].
12. Буянов Р.А., Чесноков В.В. О механизме образования углеродных нанонитей при каталитическом разложении углеводородов на металлах подгруппы железа // Катализ в промышленности. 2006. № 2. С. 3–15.
13. Chesnokov V.V., Podyacheva O.Y., Shmakov A.N., Kibis L.S., Boronin A.I., Ismagilov Z.R. Comparison of growth mechanisms of undoped and nitrogen-doped carbon nanofibers on nickel-containing catalysts // Cuihua Xuebao / Chinese J. of Catalysis. 2016. V. 37. № 1. P. 169–176. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(15\)60982-2](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(15)60982-2)
14. Чесноков В.В., Чичкань А.С., Зайковский В.И., Пармон В.Н. Закономерности образования углеродных нанонитей из C₆–C₁₆-алканов на никельсодержащих катализаторах // Кинетика и катализ. 2013. Т. 54. № 2. С. 222–228. <https://doi.org/10.7868/S0453881113020020> [Chesnokov V.V., Chichkan' A.S., Zaikovskii V.I., Parmon V.N. Formation of carbon nanofilaments from C₆–C₁₆ alkanes over nickel-containing catalysts // Kinetics and Catalysis. 2013. V. 54. № 2. P. 213–219. <https://doi.org/10.1134/S002315841302002X>].
15. Чесноков В.В., Чичкань А.С., Пармон В.Н. Образование углерода из высокомолекулярных углеводородов на металлах подгруппы железа, нанесенных на углеродный носитель сибунит // Катализ в промышленности. 2018. Т. 18. № 1. С. 67–73. <https://doi.org/10.18412/1816-0387-2018-1-67-73> [Chesnokov V.V., Chichkan' A.S., Parmon V.N. Formation of carbon from high-molecular hydrocarbons on iron subgroup metals on the sibunite carbon support // Catalysis in Industry. 2018. V. 10. № 3. P. 244–250. <https://doi.org/10.1134/S2070050418030029>].
16. Chesnokov V.V., Chichkan A.S. Effect of catalysts on tar carbonization // Catalysis Today. 2021. V. 379. P. 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.08.002>
17. Dik P.P., Klimov O.V., Koryakina G.I., Leonova K.A., Pereima V.Y., Budukva S.V., Gerasimov E.Y., Noskov A.S. Composition of stacked bed for VGO hydrocracking with maximum diesel yield // Catalysis Today. 2014. V. 220–222. P. 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2013.07.004>
18. Кардашев С.В., Максимов А.Л., Тараканова А.В., Кардашева Ю.С., Анисимов А.В., Караханов Э.А. Гидроконверсия керогенсодержащего сырья в синтетическую нефть // Химия твердого топлива. 2016. Т. 50. № 4. С. 28–33. [Kardashev S.V., Maksimov A.L., Tarakanova A.V., Kardasheva Y.S., Anisimov A.V., Karakhanov E.A. Hydroconversion of kerogen-containing raw materials into synthetic crude oil // Solid Fuel Chemistry. 2016. V. 50. № 4. P. 232–237].
19. Чесноков В.В., Чичкань А.С., Паукштитис Е.А. Влияние добавки углеродных нанотрубок на коксование антрацена // Нефтехимия. 2019. Т. 59. № 2. С. 178–183. <https://doi.org/10.1134/S0028242119020059> [Chesnokov V.V., Chichkan A.S., Paukshtis E.A. Effect of carbon nanotube admixture on anthracene coking // Petrol. Chemistry. 2019. V. 59. № 2. P. 186–191. <https://doi.org/10.1134/S0965544119020051>].
20. Шолохова А.Ю., Шашков М.В., Патрушев Ю.В., Матюшин Д.Д., Жданов А.А., Долгушев П.А., Буряк А.К. Комплексное хроматомасс-спектрометрическое исследование жидкой фракции продуктов пиролиза автомобильных шин // Журн. прикладной химии. 2021. Т. 94. № 1. С. 128–136. <https://doi.org/10.31857/S0044461821010187> [Sholokhova A.Y., Shashkov M.V., Patrushev Y.V., Matyushin D.D., Zhdanov A.A., Dolgushev P.A., Buryak A.K. Comprehensive analysis of the liquid fraction of car tire pyrolysis products by gas chromatography–mass spectrometry // Russian J. of Applied Chemistry. 2021. V. 94. № 1. P. 122–128. <https://doi.org/10.1134/s1070427221010183>].