

Организация производства и обеспечение безопасности и экологичности производственных процессов в нефтегазовой отрасли

Organization of production and ensuring the safety and environmental friendliness of production processes in the oil and gas industry

05.02.22 Организация производства (по отраслям) (технические науки)

DOI: 10.31660/0445-0108-2021-4-95-108

УДК 621;504.05

Технология получения углеродных наноматериалов методом пиролиза

О. А. Коленчуков^{1*}, Э. А. Петровский¹, Н. А. Смирнов²

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика
М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия

*e-mail: olegandrenalin.ru@mail.ru

Аннотация. Процессы добычи и подготовки нефти сопряжены с образованием смеси различных углеводородных газов, иначе называемых попутным нефтяным газом (ПНГ). Сегодня большая часть получаемого ПНГ сжигается, нанося ущерб окружающей природной среде, либо используется в качестве энергообеспечения технологического оборудования. В то же время ПНГ можно использовать в качестве ценного сырья с целью получения различных химических веществ. В статье рассмотрены существующие на сегодняшний день методы утилизации ПНГ, предложен относительно простой и экологичный пиролизный метод. Проведен сравнительный анализ способов перемешивания сырья, в результате которого выявлено, что наиболее рациональными считаются механический и вибрационный способы. Представлена экспериментальная установка переработки нефтяного попутного газа методом пиролиза. Приведены результаты экспериментальных исследований получения углеродных волокнистых наноматериалов и водорода. В качестве исходного сырья использовался газ (CH₄), полученный путем утилизации углеводородсодержащих отходов (нефтешламов). Средний выход целевых продуктов составил 81 л/ч — для водорода и 325,5 г/ч — для нановолокнистого углерода.

Ключевые слова: пиролиз; углеродный наноматериал; водород; попутный нефтяной газ; утилизация попутного нефтяного газа; технологическая реакторная линия; интенсификация теплообмена

Technology for the production of carbon nanomaterials by pyrolysis

Oleg A. Kolenchukov^{1*}, Eduard A. Petrovsky¹, Nikolay A. Smirnov²

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

*e-mail: olegandrenalin.ru@mail.ru

Abstract. The processes of oil production and preparation involve the formation of a mixture of various hydrocarbon gases, otherwise called associated petroleum gas. Today most of associated petroleum gas produced is burned, causing damage to the natural environment, or used as an energy supply for technological equipment. At the same time, associated petroleum gas can be used as a valuable raw material to produce various chemicals. In the article, the existing methods of APG utilization are considered, and the relatively simplest and most environmentally friendly pyrolysis method is proposed. A comparative analysis of the methods of mixing raw materials was carried out, as a result of which it was revealed that the mechanical and vibration methods are considered the most rational. An experimental installation for processing petroleum associated gas by pyrolysis is presented. The results of experimental studies of the production of carbon fiber nanomaterials and hydrogen are presented. Gas (CH_4) obtained by utilization of hydrocarbon-containing waste (oil sludge) was used as a feedstock. The average yield of the target products was 81 l/h for hydrogen and 325.5 g/h for nanofiber carbon.

Key words: pyrolysis; carbon nanomaterial; hydrogen; associated petroleum gas; associated petroleum gas utilization; technological reactor line; heat transfer intensification

Введение

Россия является одной из крупнейших нефтедобывающих стран мира. В 2019 году в среднем в России добывалось 10,8 млн баррелей в сутки. Согласно данным Министерства энергетики РФ за прошлый год, можно сделать вывод, что добыча углеводородов возросла относительно 2018 года (рис. 1 и 2) [1]. Ввиду нестабильности рынка нефти в 2020 году добыча нефти сократилась на 9 %, по сравнению с предыдущим годом, и составила порядка 512 млн т. Добыча газообразных углеводородов снизилась на 6 % и составила около 692 млрд м³.

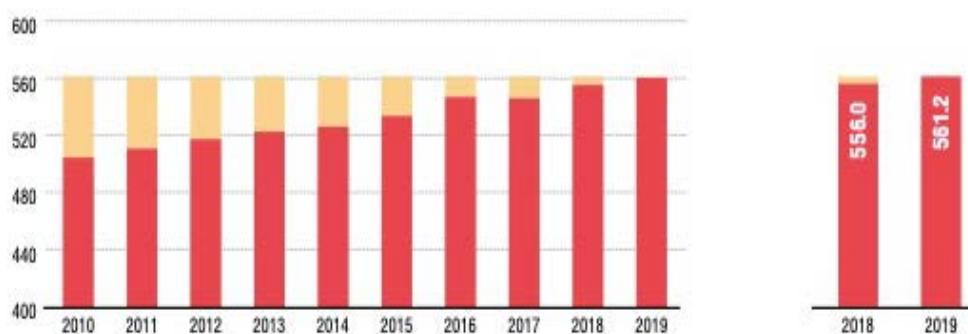


Рис. 1. Добыча нефти и газового конденсата в России в 2010–2019 гг., млн т¹

¹ Добыча нефтяного сырья. Основные показатели. Мониторинг и контроль [Электронный ресурс] / Министерство энергетики Российской Федерации. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1209> (дата обращения: 01.02.2021).

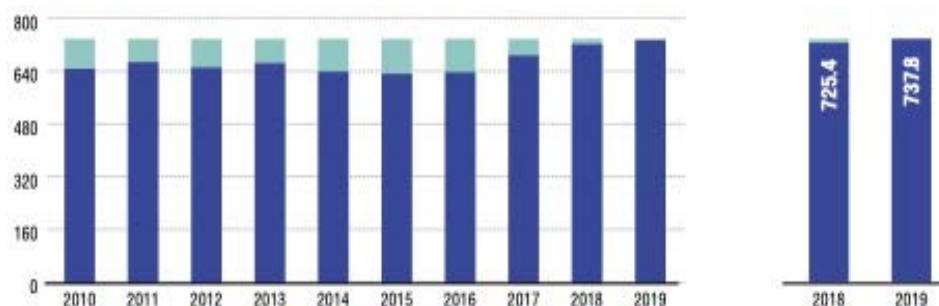


Рис. 2. Добыча газа в России в 2010-2019 гг., млрд м³ ²

Известно, что в процессе добычи и подготовки нефти также образуется попутный нефтяной газ (ПНГ). В зависимости от района добычи и месторождения на одну тонну товарной нефти получают от 25 до 800 м³ ПНГ, в результате переработки которого можно получить полезные продукты (топливо, химическое сырье и др.) [1–4].

ПНГ в основном состоит из смеси легких углеводородов. Это, прежде всего, метан — главный компонент природного газа, а также более тяжелые компоненты: этан, пропан, бутан, изобутан и растворенные в них высокомолекулярные жидкости (пентан и выше). В таблице 1 приведен пример молекулярного состава попутного газа Самотлорского месторождения [5].

Таблица 1

Молекулярный состав попутного нефтяного газа

Компонент газовой смеси		% масс.
Метан	CH ₄	60,64
Этан	C ₂ H ₆	4,13
Пропан	C ₃ H ₈	13,05
Изобутан	iC ₄ H ₁₀	4,04
Н-бутан	nC ₄ H ₁₀	8,6
Изопентан	iC ₅ H ₁₂	2,52
Н-пентан	nC ₅ H ₁₂	2,65
Азот	N ₂	1,48
Диоксид углерода	CO ₂	0,59

Во времена зарождения нефтяной отрасли попутный газ просто сжигался на факелах (рис. 3). Данная экологическая проблема в настоящее время является актуальной и наиболее значимой для российской нефтегазовой отрасли. Данный метод экономически нецелесообразен, так как ПНГ является ценным сырьем, а также приводит к возникновению ряда экологических проблем. В результате сжигания газа в факельных установках образуется около 100 млн т CO₂ в год. Опасность также представляют выбросы сажи: экологи утверждают, что мельчайшие частицы сажи могут переноситься на значительные расстояния и оседать на поверхности снега и льда [6–7].

² Добыча нефтяного сырья...

Одной из центральных причин крупномасштабного сжигания ПНГ является отсутствие общественного контроля. Начиная с весны 2009 года, Российская Федерация совместно с фондом дикой природы организовала компанию по контролю и снижению нецелесообразного применения ПНГ — сжиганию. Однако экономический кризис, бурно развивающийся на рубеже 2014–2015 гг. и длящийся по сегодняшний день, привел к снижению коэффициентов расчета штрафов за сверхнормативное сжигание ПНГ, что позволяет тем самым нефтяным компаниям временно приостановить контроль за сжиганием ПНГ [8].



Рис. 3. Сжигание попутного нефтяного газа

Хотя большинство ПНГ на сегодняшний день сжигается, существуют и другие методы с его обращением:

- переработка на газоперерабатывающих заводах (ГПЗ);
- использование в газогенераторах для выработки электроэнергии и тепла;
- подача в магистральный газопровод для транспортировки к потребителю;
- закачивание в пласт для увеличения пластового давления и повышения нефтеотдачи;
- газоразделение (криогенные, мембранные и адсорбционные технологии);
- химическая переработка в синтетическое топливо (технологии ГЖК/GTL и др.) и производство метанола [9].

В России наиболее распространенными из перечисленных технологий являются первые три. Каждый из перечисленных методов имеет свои сложности и недостатки, особенно если дело касается месторождений с плохо развитой инфраструктурой для сбора и транспортировки газа.

Среди методов газоразделения наиболее часто используется метод криогенной (низкотемпературной) сепарации. Метод низкотемпературной сепарации основан на том факте, что температура кипения диоксида углерода (CO_2) выше, чем у метана (CH_4) ($-78,2^\circ\text{C}$ у CO_2 и -161°C у CH_4). При осуществлении декарбонизации данным методом газообразное сырье

предварительно обезвоживается для предотвращения замерзания. Далее газ поступает в теплообменник для его охлаждения, после чего редуцируется до давления максимально возможной конденсации. Таким образом, CH_4 остается в газообразном состоянии, а CO_2 — в жидком, что позволяет очистить и/или отделить CH_4 . Среди недостатков данной технологии можно выделить высокие капитальные и энергетические затраты, а также необходимость отвода замерзающих соединений [10].

Газожидкостная конверсия (ГЖК/GTL) предназначена для преобразования ПНГ и прочих углеводородных газов в жидкое топливо. Выделяют следующие три этапа переработки:

1) получение синтез-газа ($\text{CO}+\text{H}_2$) из предварительно очищенного от серы ПНГ или природного газа (также возможно использование угля, биомассы и др.) путем каталитического риформинга, паровой конверсии или парциального окисления;

2) преобразование синтез-газа, с помощью реакции Фишера — Тропша, в *n*-алканы (жидкие углеводороды);

3) гидрокрекинг и гидрооблагораживание полученных веществ.

Конечными продуктами ГЖК являются автомобильные топлива, а также продукты химической и электротехнической продукции. Основные технологии ГЖК — это производство кислородсодержащих жидких компонентов (метанол, диметоксизтан) и продуктов реакции Фишера — Тропша для производства высококачественных средних дистиллятов (реактивное и дизельное топливо, керосин и др.). В то же время с помощью реакций ГЖК синтез-газа можно получать многие другие ценные продукты, такие как линейные альфа-олефины, метан и водород [11]. Несмотря на широкие возможности применения метода ГЖК, у него есть существенные недостатки:

- высокая техническая сложность осуществления процесса ГЖК;
- высокие капитальные затраты (около 200 тысяч долларов для установки мощностью 1 баррель в день).

Таким образом, для осуществления перечисленных технологий необходимы дополнительная очистка и подготовка ПНГ, что ведет за собой возникновение сложностей технико-экономического обоснования проектов переработки попутного нефтяного газа непосредственно на самих месторождениях. Поэтому на промыслах преимущественно отдают предпочтение факельным установкам и сжиганию ПНГ в газозлектрогенераторах. Но при осуществлении данных методов происходит выброс вредных продуктов горения в атмосферу.

Одним из перспективных способов утилизации попутного нефтяного газа является пиролиз с использованием катализатора. Отличие данного метода от вышеперечисленных заключается в следующем: процесс происходит в закрытой системе без выбросов в атмосферу; получение ценных продуктов, таких как углеродные наноматериалы и водород. Углеродные наноматериалы представляют большой интерес для электроники, для применения в качестве адсорбционных и каталитических систем, химических источников тока и пластин для двухслойных конденсаторов [12–14].

Помимо попутного нефтяного газа, в качестве исходного сырья можно использовать легкие углеводороды, полученные при пиролизе нефтяных отходов, что позволяет разрабатывать целые технологические реакторные

линии для переработки отходов нефтяных производств. Но, как и в любой технологии, при получении углеродных наноматериалов возникает ряд технологических проблем, таких как необходимость в перемешивании подаваемого исходного сырья со слоем катализатора, а также необходимость в разработке эффективного и производительного оборудования и технологии его изготовления.

Для выбора рационального способа перемешивания был проведен сравнительный анализ, представленный в таблице 2. Из этого следует, что вибрационный метод перемешивания характеризуется меньшими недостатками по сравнению с другими методами, но остается актуальной задача по демпфированию вибраций с целью снижения вредного воздействия на организм человека и производственное оборудование [15, 16]. Еще одним перспективным методом перемешивания при пиролизе является механический, а именно с помощью мешалок, но в этом случае требуются разработка специальных перемешивающих устройств, а также подбор необходимого материала.

Таблица 2

Сравнительный анализ способов перемешивания

Вид перемешивания	Краткое описание	Недостаток
Электромагнитное	Представляет собой электромагнитное воздействие на среду. Электромагнитное поле создают внутри реактора путем наложения скрещенных электрического и магнитного полей	Низкая эффективность перемешивания. Ограниченное управление траекторией, что делает процесс непредсказуемым
Ультразвуковое	Представляет собой воздействие ультразвука на более мелкие частицы сырья или катализатора, уменьшение их до однородных, впоследствии эти части распределяются равномерно между собой	Низкая эффективность перемешивания. Вредное воздействие на окружающих
Пневматическое	Осуществляется за счет пропускания газа или пара через слой перемешиваемой жидкости	Область применения ограничена. Процесс осуществляется короткими временными периодами
Механическое	Осуществляется вращательным движением мешалок различного типа	Ограниченное применение в агрессивных средах. Необходимость подбора перемешивающего устройства под конкретный процесс
Вибрационное	Осуществляется при возвратно-поступательном движении мешалок различного типа	Негативное влияние вибраций на организм человека и технологическое оборудование

Объект и методы исследования

С целью изучения технологии пиролиза для получения водорода и нановолокнистого углерода была разработана экспериментальная установка, представленная на рисунке 4 [17]. Все работы производились на кафедре технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса Ин-

ститута нефти и газа Сибирского федерального университета. Экспериментальная установка содержит корпус реактора 1, разделенный внутри секциями; перемешивающее вибрационное устройство 2; обогревающий контур 3; люк с запорным механизмом 4 для выгрузки готового продукта; входной патрубок 5 для подачи теплового газа; выходной патрубок 6 для отвода теплового газа; входной патрубок 7, предназначенный для подачи углеводородных газов; патрубок 8 для подачи катализатора; выходной патрубок 9 для отвода газообразных продуктов пиролиза и люк 10 для переноса экспериментальной установки.

Принцип работы экспериментальной установки можно описать следующим образом (см. рис. 4). Через патрубок для ввода катализатора 8 вводится необходимое количество катализатора для одного цикла работы реактора; далее, через входной патрубок 5 подают раскаленные тепловые газы для обогрева реакционной зоны реактора, через обогревающий контур 3, и отводят их через выходной патрубок 6, тем самым осуществляя непрерывное течение газа по обогреваемому контуру; затем в корпус реактора 1 подают необходимое количество углеводородного газа, который, приобретая дополнительное ускорение внутри реакционной зоны благодаря конструктивным особенностям вступает в реакцию с катализатором; перемешивание осуществляют с помощью вибрационного перемешивающего устройства 2. Образующиеся в ходе реакции водород и непрореагировавшие углеводороды отводятся через выходной патрубок 9. Все патрубки экспериментальной установки снабжены запорными клапанами (на рисунке не показаны). В начале работы реактора запорные клапаны патрубков 7, 8 и 9 закрыты, а клапаны патрубков 5 и 6 открыты. После достижения указанной температуры открывают патрубки 7 и 9 и осуществляют циклический ввод углеводородных газов через патрубок 7 и вывод продуктов пиролиза через патрубок 9, при этом клапан патрубка 8 открывают в начале работы реактора, когда необходим ввод катализатора. Люк 4 предназначен для выгрузки твердых продуктов пиролиза, а люк 10 — для переноса экспериментальной установки и для перемещения реакторной зоны вдоль перемешивающего устройства 2 с целью выбора более оптимальной позиции.

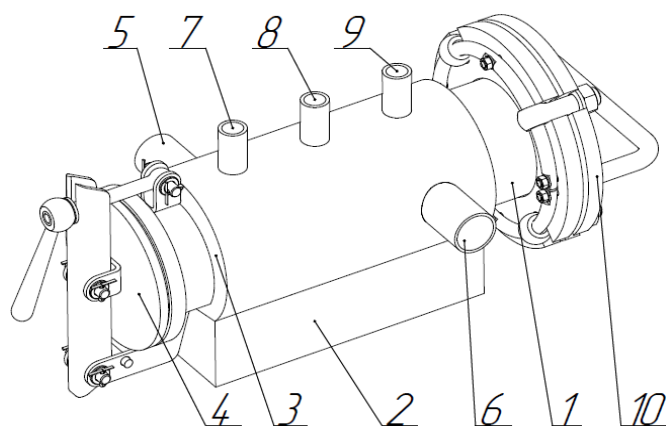


Рис. 4. Перспективное изображение экспериментальной установки для получения нановолокнистого углерода и водорода

Результаты и их обсуждение

Процентный состав катализатора, состав углеводородного газа и выход углеводородного материала, температура и время реакции представлены в таблице 3. В качестве исходного сырья применялись углеводородные газы, полученные в работах [18, 19] при пиролизе нефтешламов. В роли химического вещества, ускоряющего реакцию, было принято использовать оптимальный катализатор на основе Ni и/или Cu [20, 21], а носителя — оксид алюминия (Al_2O_3) и диоксид кремния (SiO_2). Полученные образцы измерялись с помощью аналитических весов AND HR-250 AG, объем водорода измерялся с помощью вихревого газового расходомера.

Таблица 3

Условия и результаты экспериментальных исследований

Состав катализатора, % масс.	Состав исходных углеводородов	Температура реакции, °C	Выход нановолокнистого углерода, г/ч	Выход водорода, л/ч
90 % Ni + 10 % Al_2O_3	CH_4 (метан)	550 ± 20	205	55
90 % Ni + 10 % Al_2O_3	CH_4 (метан)	650 ± 20	422	110
70 % Ni + 20 % Cu + 10 % Al_2O_3	CH_4 (метан)	550 ± 20	182	44
70 % Ni + 20 % Cu + 10 % Al_2O_3	CH_4 (метан)	650 ± 20	430	115
70 % Ni + 20 % Cu + 10 % SiO_2	CH_4 (метан)	550 ± 20	334	89
70 % Ni + 20 % Cu + 10 % SiO_2	CH_4 (метан)	650 ± 20	452	118

На рисунках 5 и 6 представлены внешний вид гранул получаемого нановолокнистого углерода, а также микрофотографии, полученные при помощи просвечивающего электронного микроскопа марки JEM-100сх.



Рис. 5. Внешний вид и средний размер гранул получаемого нановолокнистого углеродного материала

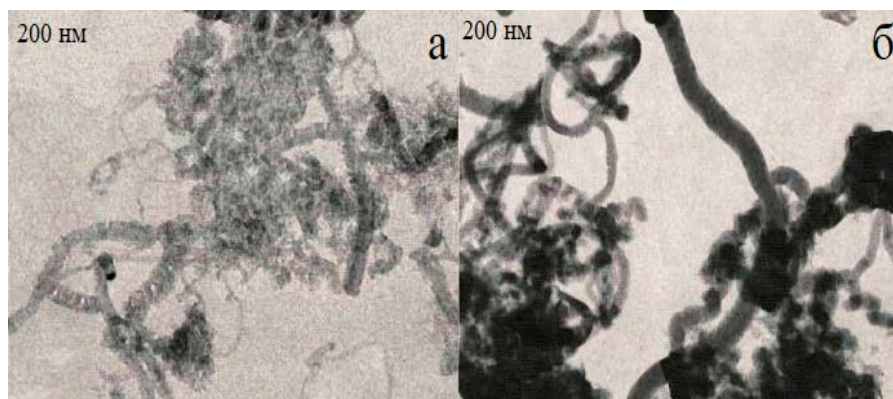


Рис. 6. Микрофотография углеродных нановолокон:

а) 70% Ni + 20 % Cu, $T = 550 \pm 20$ °C;

б) 70 % Ni + 20 % Cu, $T = 650 \pm 20$ °C

При детальном рассмотрении структуры наноматериала видны формирующиеся крупные волокна (до 100 нм) поверхности частиц катализатора. Помимо этого, наблюдалось расщепление крупных частиц катализатора на более мелкие, с образованием волокон меньших размеров (10÷60 нм). В нескольких случаях наблюдалось образование пучков диаметром от 200 до 500 нм с ответвляющимися тонкими волокнами. Таким образом, полученные углеродные волокнистые наноматериалы могут быть применены, например, в качестве адсорберов, полимерных композиционных материалов, а также носителей катализатора [22].

Технологическое исполнение реакторной линии

Технологическое оформление реакторной линии для комплексной переработки углеводородных материалов (отходов) можно представить следующим образом (рис. 7).

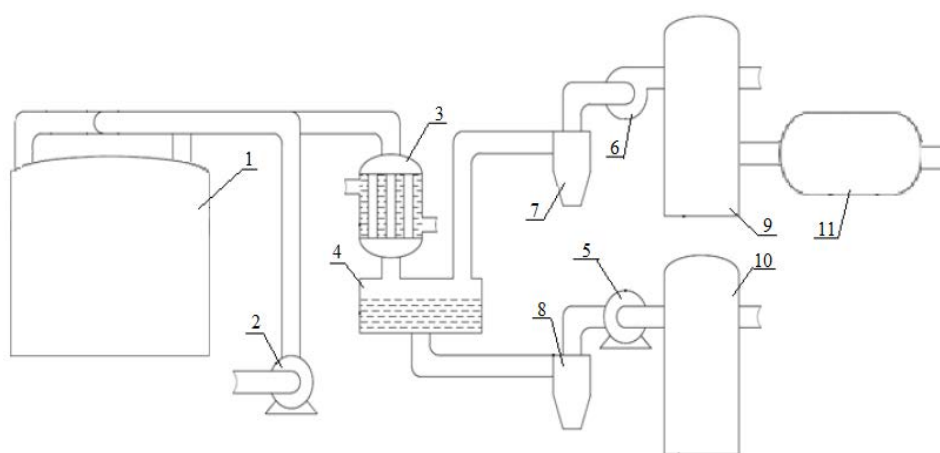


Рис. 7. Технологическое исполнение реакторной линии для комплексной утилизации углеводородных материалов

Реакторная линия содержит реактор пиролиза 1, предназначенный для утилизации углеводородных отходов; насос 2 для подачи исходного сырья; теплообменник 3; отстойник 4. Реакторная линия также содержит насос 5, предназначенный для вывода жидких продуктов пиролиза; вентилятор высокого давления 6 для вывода смеси газообразных продуктов; циклон 7 и гидроциклон 8. При этом в реакторной линии предусмотрен газгольдер 9, ресивер 10 для хранения продуктов пиролиза и реактор для получения углеродных наноматериалов и водорода 11.

Таким образом, переработка углеводородных материалов, непригодных для дальнейшего использования из-за различных причин (дороговизна, низкое качество сырья (в том числе отходы) и др.), состоит из двух технологических переделов.

На первом технологическом переделе происходит пиролиз углеводородных отходов с целью получения жидких (предельные, непредельные, циклические и ароматические углеводороды), твердых (полукокс, зольный остаток) и газообразных (метан, этилен, этан, пропан, бутилен) веществ. Данные вещества могут быть использованы в качестве топлива и сырья в химической промышленности и строительстве.

На втором технологическом переделе происходит получение нановолокнистого материала и водорода. На данном этапе может быть использован как образующийся газ с первого этапа, обеспечивая тем самым комплексный подход к утилизации углеводородных отходов, так и образующийся в ходе добычи и подготовки нефти ПНГ. Получаемый при этом наноматериал имеет широкую сферу применения (изготовление деталей в электронике, носителей катализаторов, композитов и др.), а водород используется в качестве экологически чистого топлива.

Выводы

- На данный момент вопрос переработки и утилизации попутного нефтяного газа является актуальной задачей как со стороны экологии, так и со стороны получения дополнительных источников топлива и материалов для химической, нефтехимической и других отраслей народного хозяйства. Реализация технологии пиролиза в данном направлении позволяет получать водород, используемый в качестве топлива и сырья в химическом синтезе, а также углеродные наноматериалы для производства различных продуктов с минимальным воздействием на окружающую среду (по сравнению со сжиганием).

- Технология изготовления конструкции реактора с интенсификаторами теплообмена позволяет повысить эффективность процесса, а использование вибрационных или механических перемешивающих устройств способствует повышению производительности пиролиза.

- Проведенные исследования показали, что полученный на экспериментальной установке углеродный наноматериал представляет собой гранулы со средним размером от 4 до 5 мм, состоящие в основном из переплетенных между собой волокон размером 10–100 нм (в некоторых случаях — от 200 до 500 нм). Выход целевых продуктов находится в диапазоне от 205 до 452 г/ч для нановолокнистого углерода в зависимости от катализатора за час работы реактора и от 44 до 118 л/ч для водорода.

Также при увеличении температуры наблюдалось увеличение выхода конечных продуктов.

- Пиролизный метод целесообразно применять на технологических реакторных линиях, он позволяет получать и перерабатывать углеводородсодержащие отходы (нефтяные шламы) на первом технологическом переделе и перерабатывать попутные нефтяные газы и/или углеродные газы, полученные на первом этапе, тем самым обеспечивая комплексный подход борьбы с данным видом отходов.

Данное исследование было частично профинансировано Стипендией Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов СП-3129.2019.1.

Библиографический список

1. Баскаев, К. Чемодан без ручки / К. Баскаев. – Текст : непосредственный // Нефть России. – 2011. – № 1. – С. 56–59.
2. Агауров, С. Ю. Нетрадиционная утилизация ПНГ. Переработка попутного газа в естественные компоненты нефти / С. Ю. Агауров, Ю. Л. Гунбин. – Текст : электронный // Деловой журнал «Neftegaz.ru». – 2018. – № 4. – URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/pererabotka/521880-netraditsionnaya-utilizatsiya-png-pererabotka-poputnogo-gaza-v-estestvennye-komponenty-nefti/>.
3. Vorobev, A. Associated Petroleum Gas Flaring: The Problem and Possible Solution / A. Vorobev, E. Shchesnyak. – DOI 10.1007/978-3-030-22974-0_55. Direct text // 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019). – 2019. – P. 227–230.
4. New Potentialities for Utilization of Associated Petroleum Gases in Power Generation and Chemicals Production / V. S. Arutyunov, V. I. Savchenko, I. Sedov [et al.]. – DOI 10.18321/ectj662. Direct text // Eurasian Chemico-Technological Journal. – 2017. – Issue 19(3). – P. 265–271.
5. Андрейкина, Л. В. Состав, свойства и переработка попутных газов нефтяных месторождений Западной Сибири : специальность 02.00.13 «Нефтехимия», 07.00.10 «История науки и техники» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Андрейкина Людмила Васильевна. – Уфа, 2005. – 21 с. – Текст : непосредственный.
6. Книжников, А. Проблемы и перспективы использования нефтяного попутного газа в России / А. Книжников, Н. Пусенкова. – Текст : непосредственный // Ежегодный обзор проблемы в рамках проекта «Экология и Энергетика. Международный контекст». – Москва, 2009. – Выпуск 1. – 28 с.
7. Загрязнение окружающей среды при сжигании попутного нефтяного газа на территории нефтедобывающих предприятий / Л. К. Алтунина, Л. И. Сваровская, И. Г. Ященко, М. Н. Алексеева. – Текст : непосредственный // Химия в интересах устойчивого развития. – 2014. – № 22. – С. 217–222.
8. Книжников, А. Ю. Проблемы и перспективы использования попутного нефтяного газа в России / А. Ю. Книжников, А. М. Ильин. — Москва : Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2017. – 32 с. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/97448.html>. – Текст : электронный.
9. Федяева, И.М. Оценка эффективности способов переработки попутных нефтяных газов месторождений Западной Сибири / И. М. Федяева, А. А. Новиков. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. 2010. – № 4(19). – С. 73–80.
10. Chapter Seven – Biogas upgrading / L. Xie, J. Xu, Y. Zhang, Y. He. – DOI 10.1016/bs.aibe.2020.04.006. – Direct text // Advances in Bioenergy. – 2020. – Vol. 5. – P. 309–344.

11. Bart, J. C. J. Evolution of biodiesel and alternative diesel fuels / J. C. J. Bart, N. Palmeri, S. Cavallaro. – DOI 10.1533/9781845697761.713. – Direct text // *Biodiesel Science and Technology*. – 2010. – P. 713–782.
12. Получение углеродных наноматериалов с использованием пористого оксида алюминия как темплата / О. К. Красильникова, А. С. Погосян, Н. В. Серебрякова [и др.]. – Текст : непосредственный // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. – 2008. – Т. 44, № 4. – С. 389–394.
13. Sengupa, J. Application of carbon nanomaterials in the electronic industry. Handbook of Nanomaterials for Manufacturing Applications. Micro and Nano Technologies / J. Sengupa. – DOI: 10.1016/B978-0-12-821381-0.00017-X. – Direct text. – Elsevier. – 2020. – P. 421–450.
14. Zaytseva, O. Carbon nanomaterials : production, impact on plant development, agricultural and environmental applications / O. Zaytseva, G. Neunmann. – DOI 10.1186/s40538-016-0070-8. – Direct text // *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. – 2016. – Issue 17. – P. 26.
15. Богданов, Ю. В. Моделирование динамики ротора электрошпинделя на магнитных подшипниках / Ю. В. Богданов, А. М. Гуськов. – DOI 10.7463/0115.0753146. – Текст: непосредственный // *Наука и образование*. – 2015. – № 1. – С. 201–220.
16. Берлин, А. Я. Техника лабораторной работы в органической химии / А. Я. Берлин. – Москва – Ленинград, 1952. – 287 с. – Текст : непосредственный.
17. Патент на полезную модель № 185231 U1 Российская Федерация, МПК C01B 3/28, C01B 32/162, B82B 3/00. Реактор для переработки углеводородов с получением водорода и нановолокнистого углерода : № 2018127269 : заявл. 24.07.2018 : опубл. 27.11.2018 / Корнеев А. Е., Соловьев Е. А., Петровский Э. А.; заявитель Сибирский федеральный университет. – 9 с. – Текст : непосредственный.
18. Petrovsky, E. A., Study of pyrolysis of oil sludge / E. A. Petrovsky, O. A. Kolenchukov, E. A. Solovyev. – Direct text // *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 537. – P. [1–5].
19. Коленчуков, О. А. Разработка технологических энергосберегающих система на основе пиролизных реакторов / О. А. Коленчуков, Э. А. Петровский. – DOI 10.17122/ngdelo-2020-1-130-136. – Текст: непосредственный // *Нефтегазовое дело*. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 130–136.
20. Патент № 2312059 C1 Российская Федерация, МПК C01B 3/26, B01J 23/72, B01J 23/755. Способ получения водорода и нановолокнистого углерода : № 2006110780/15 : заявл. 03.04.2006 : опубл. 10.12.2007 / Соловьев Е. А., Кувшинов Д. Г., Ермаков Д. Ю., Кувшинов Г. Г.; заявитель Институт катализа им. Г. К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирский государственный технический университет. – 8 с. – Текст : непосредственный
21. Патент № 2462293 C1 Российская Федерация, МПК B01D 53/00, C01B 3/26, B82B 3/00. Способ получения нановолокнистого углеродного материала и водорода : № 2011100755/05 : заявл. 12.01.2011 : опубл. 27.09.2012 / Ананьев И. В., Варфоломеева А. С., Кувшинов Г. Г. [и др.] ; заявитель Новосибирский государственный технический университет. – 9 с. – Текст : непосредственный.
22. Наноструктурированные углеродные материалы в катализе и адсорбции / В. А. Лихолобов, В. Ф. Сурувикин, М. С. Плаксин [и др.]. – Текст : непосредственный // *Катализ в промышленности*. – 2008. – С. 63–68.

References

1. Baskaev, K. (2011). Chemodan bez ruchki. *Neft' Rossii*, (1), pp. 56-59. (In Russian).
2. Agaurov, S. Yu. (2018). Netraditsionnaya utilizatsiya PNG. *Pererabotka poputnogo gaza v estestvennye komponenty nefti*. *Delovoy zhurnal "Neftegaz.ru"*, (4). (In Russian). Available at: <https://neftgaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/141459-poputnyy-neftyany-gaz-png/>
3. Vorobev, A., & Shchesnyak, E. (2019). Associated Petroleum Gas Flaring: The Problem and Possible Solution. 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019). *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*, pp. 227-230. (In English). DOI: 10.1007/978-3-030-22974-0_55

4. Arutyunov, V. S., Savchenko, V. I., Sedov, I., Nikitin, A. V., Troshin, K. Y., Norisov A. A., & Strekova, L. N. (2017). New Potentialities for Utilization of Associated Petroleum Gases in Power Generation and Chemicals Production. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 19(3), pp. 265-271. (In English). DOI: 10.18321/ectj662
5. Andreykina, L. V. (2005). *Sostav, svoystva i pererabotka poputnykh gazov neftyanykh mestorozhdeniy Zapadnoy Sibiri*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk. Ufa, 21 p. (In Russian).
6. Knizhnikov, A., & Pusenkova, N. (2009). Problemy i perspektivy ispol'zovaniya neftyanogo poputnogo gaza v Rossii. *Ezhegodnyy obzor problemy v ramkakh proekta "Ekologiya i Energetika Mezhdunarodnyy kontekst"*. Vypusk 1. Moscow, 28 p. (In Russian).
7. Altunina, L. K., Svarovskaya, L. I., Yashchenko, I. G., & Alekseeva, M. N. (2014). Zagryaznenie okruzhayushchey sredy pri szhiganiy poputnogo neftyanogo gaza na territorii neftedobyvayushchikh predpriyatiy. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, (22), pp. 217-222. (In Russian).
8. Knizhnikov, A. Yu., & Il'in, A. M. (2017). Problemy i perspektivy ispol'zovaniya poputnogo neftyanogo gaza v Rossii. Moscow, 32 p. (In Russian). Available at: <https://www.iprbookshop.ru/97448.html>
9. Fedyaeva, I. M., & Novikov, A. A. (2010). Evaluation of the methods of processing following oil gases of the West Siberia layers. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*, (4(19)), pp. 73-80. (In Russian).
10. Xie, L., Xu, J., Zhang, Y., & He, Y. (2020). Chapter Seven - Biogas upgrading. *Advances in Bioenergy*, (5), pp. 309-344. (In English). DOI: 10.1016/bs.aibe.2020.04.006
11. Bart, J. C. J., Palmeri, N., & Cavallaro, S. (2010). Evolution of biodiesel and alternative diesel fuels. *Biodiesel Science and Technology*, pp. 713-782. (In English). DOI: 10.1533/9781845697761.713
12. Krasil'nikova, O. K., Pogosyan, A. S., Serebryakova, N. V., Grankina, T. Yu., & Khodan, A. N. (2008). Poluchenie uglerodnykh nanomaterialov s ispol'zovaniem poristogo oksida alyuminiya kak templata. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov*, 4(44), pp. 389-394. (In Russian).
13. Sengupta, J. (2020). Application of carbon nanomaterials in the electronic industry. *Handbook of Nanomaterials for Manufacturing Applications. Micro and Nano Technologies*, pp. 421-450. (In English). DOI: 10.1016/B978-0-12-821381-0.00017-X
14. Zaytseva, O., & Neumann, G. (2016). Carbon nanomaterials: production, impact on plant development, agricultural and environmental applications. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, (17), p. 26. (In English). DOI: 10.1186/s40538-016-0070-8
15. Bogdanov, Yu. V., & Gus'kov, A. M. (2015). Modelirovanie dinamiki rotora elektroshtindelya na magnitnykh podshipnikakh. *Science & education*, (1), pp. 201-220. (In Russian). DOI: 10.7463/0115.0753146
16. Berlin, A. Ya. (1952). *Tekhnika laboratornoy raboty v organicheskoy khimii*. Moscow - Leningrad, 287 p. (In Russian).
17. Korneev, A. E., Solov'ev, E. A., & Petrovskiy, E. A. Reaktor dlya pererabotki uglevododorodov s polucheniem vodoroda i nanovoloknistogo ugleroda. Pat. RF 185231 U1. No 2018127269. Applied: 24.07.2018. Published: 27.11.2018. (In Russian).
18. Petrovsky, E. A., Kolenchukov, O. A., & Solovyev, E. A. (2019). Study of pyrolysis of oil sludge. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 537, pp. [1-5]. (In English). DOI: 10.1088/1757-899x/537/3/032082
19. Kolenchukov, O. A., & Petrovsky, E. A. (2020). Development of technological energy-saving systems based on pyrolysis reactors. *Petroleum Engineering*, 18(1), pp. 130-136. (In Russian). DOI: 10.17122/ngdelo-2020-1-130-136
20. Solov'ev, E. A., Kuvshinov, D. G., Ermakov, D. Yu., & Kuvshinov, G. G. Sposob polucheniya vodoroda i nanovoloknistogo ugleroda. Pat. RF 2312059 C1. No 2006110780/15. Applied: 03.04.2006. Published: 10.12.2007. (In Russian).
21. Anan'ev, I. V., Varfolomeeva, A. S., Kuvshinov, G. G., Kuvshinov, P. B., Solov'ev, E. A., Trachuk, A. V., ... Shinkarev, V. V. Pat. RF 2462293 C1. No 20111100755/05. Applied: 12.01.2011. Published: 27.09.2012. (In Russian).
22. Likholobov, V. A., Surovikin, V. F., Plaksin, G. V., Tsekhanovich, M. S., Surovikin, Y. V., & Baklanova, O. N. (2008). Nanostructured carbon materials for catalysis and adsorption. *Catalysis in Industry*, pp. 63-68. (In Russian).

Сведения об авторах

Коленчуков Олег Александрович, аспирант кафедры технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, e-mail: olegandrenalin.ru@mail.ru

Петровский Эдуард Аркадьевич, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Смирнов Николай Анатольевич, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой технической механики, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, г. Красноярск

Information about the authors

Oleg A. Kolenchukov, Postgraduate at the Department of Technological Machines and Equipment of the Oil and Gas Complex, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: olegandrenalin.ru@mail.ru

Eduard A. Petrovsky, Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Technological Machines and Equipment of the Oil and Gas Complex, Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Nikolay A. Smirnov, Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Technical Mechanics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk