

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: 10.31660/0445-0108-2019-5-160-169

УДК 662.613

Основы метода переработки органических твердых бытовых отходов коксованием

А. Н. Пауков^{1*}, Р. З. Магарил¹, Е. Р. Магарил²

¹Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: al.paukov@gmail.com

Аннотация. Разработан новый низкотемпературный экологически безопасный способ эффективной переработки коксованием твердых бытовых отходов органического происхождения, который может быть использован в дальнейшем для переработки любых видов органических отходов. Даны рекомендации по применению продуктов переработки.

Ключевые слова: реформа обращения с отходами; переработка коксованием; органические твердые бытовые отходы; продукты переработки

Fundamentals of the method for organic solid waste processing by coking

Alexey N. Paukov^{1*}, Romen Z. Magaril¹, Elena R. Magaril²

¹Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

²Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia

*e-mail: al.paukov@gmail.com

Abstract. A new low-temperature environmentally safe method of efficient processing of municipal solid waste of organic origin by coking has been developed, which can be used in the future for processing any types of organic waste. In addition, recommendations on the use of processed products were provided.

Key words: waste management reform; coking processing; organic solid waste; processed products

Введение

В условиях реформы обращения с отходами в России одним из стратегических приоритетов является развитие технологических инноваций, направленных на переработку отходов. В настоящее время разработано множество способов переработки промышленных и бытовых отходов, но значительное их количество не находит практического применения.

Среди термических способов переработки отходов известны такие методы, как пламенное сжигание, торрификация, пиролиз, газификация и др. [1–6]. Недостатком термических методов переработки отходов являются высокие затраты, они не обеспечивают экологическую безопасность процесса, а полученные продукты не пригодны для использования без дополнительного улучшения качества с помощью дорогостоящих процессов. Так, для повышения тепловой эффективности получения энергии из содержащих влагу отходов путем пиролиза и газификации требуется предварительная сушка сырья, что повышает эксплуатационные расходы [6]. В процессах термической переработки отходов образуются вторичные шлаки, требующие дальнейшей переработки или захоронения, отработавшие газы содержат токсичные соединения и требуют обезвреживания.

При выборе технологии переработки твердых бытовых отходов (ТБО) ключевой проблемой является удовлетворение требованиям экологичности, низкой энергоемкости, безопасности. Метод коксования, по сравнению с пиролизом и другими методами термической переработки, требует меньших энергозатрат и в то же время может дать при комбинации с методами нефтепереработки большой выход товарных жидких нефтепродуктов — бензинов, дизельных и котельных топлив. Между тем исследования возможности промышленного применения данного метода весьма ограничены, в промышленных масштабах метод не применяется. Цель работы — исследование термического разложения несортированных органических ТБО в процессе коксования и обсуждение возможностей промышленного применения процесса.

Методы исследования

В качестве сырья коксования мы использовали смесь полугудрона с ТБО (1:4 по массе). Данное соотношение принято на основании оценки количества образующегося мусора и вырабатываемого остаточного, невостребованного полугудрона. Для термолиза на основании статистики выбрасываемых отходов использовали твердые бытовые отходы, исключая отходы минеральной группы (стекло, металл, керамика), которые состояли из бумаги, пластика (полиэтиленовые одноразовые бутылки и медицинские одноразовые шприцы), резины (автомобильные шины) и пищевых отходов (картофельная кожура). Для понимания влияния процесса коксования на различные виды органических материалов проводили исследования как индивидуальных, так и смешанных видов сырья. Кроме смеси каждого из перечисленных образцов с полугудро-

ном в качестве сырья использовали смесь из всех образцов, взятых в равных соотношениях. Использование смеси бытовых отходов с полугудроном облегчает протекание процесса ввиду того, что в процесс вводятся высокомолекулярные полициклические углеводороды гудрона [7, 8].

Используемый полугудрон сургутской нефти имел относительную плотность $\rho_4^{20} = 0,985$; коксуюемость 12–13 % масс.; содержание серы 2,2–2,4 % масс. Отдельно проведен опыт с термолизом полугудрона без добавления ТБО для определения чистого выхода продуктов и составления материального баланса и последующей оценки влияния каждого из видов отходов на выход продуктов коксования.

Коксование проводили на стандартной лабораторной установке периодического коксования [9, 10]. Используемые твердые отходы мелко измельчали и перемешивали с полугудроном, после чего 50 г сырьевой смеси помещали в коксовый реактор. Далее присоединяли водяной холодильник, предварительно взвешенные абсорбер и приемник. Разогрев реактора вели при помощи газовой горелки.

Путем изменения времени разогрева сырья до достижения данной температуры термолиза и изменением температуры термолиза при постоянном времени разогрева сырья мы установили оптимальные параметры процесса. Наиболее выгодным температурным диапазоном является интервал 400–420 °С. В данном интервале температур наблюдается максимальный выход жидких продуктов коксования, а получаемый твердый остаток является сухим и не содержит жидких высококипящих фракций. Установлено влияние скорости разогрева сырьевой смеси термолиза на выход продуктов термолиза и определен оптимальный диапазон скорости разогрева 5–7 °С/мин, обеспечивающий максимальный выход углеводородного дистиллята. Так как выход газов коксования и углеводородного дистиллята при разогреве сырьевой смеси до 400 °С на протяжении более 80 мин не меняется, превышать время разогрева до температуры коксования свыше 80 мин не следует с целью экономии топливных ресурсов.

Коксование проводили в течение 240 мин. Спустя некоторое время после нагрева температура в парах повышалась, и в приемнике появлялись первые капли дистиллята. После этого при установленной примерно постоянной температуре (400–420 °С) проходил процесс разложения и коксования сырья, и наблюдалось значительное выделение газа. Для проведения анализа газа его отбирали в газовую бюретку. Завершение коксования определяли по окончании выделения дистиллята. Затем с целью прокалики кокса и удаления летучих углеводородов реактор прогревали в течение 30–40 мин, по окончании реактор остужали и вскрывали. Продуктами коксования всех образцов отходов являлись вода, углеводородный дистиллят, газ и кокс, массу которых определяли по окончании каждого опыта. Реактор после охлаждения вскрывали и зачищали от кокса, полученный твердый остаток взвешивали. Зольность твердого остатка определяли по массе золы, образовавшейся после сжигания навески топлива при свободном доступе воздуха и прокаливании зольного остатка до постоянной массы при температуре (815 ± 10) °С. Содержание углерода и серы в твердом остатке определяли на анализаторе ELTRA CHS-580 (принцип детектирования — метод инфракрасной абсорбции).

Анализ газообразных продуктов производили на газоанализаторе ВТИ-2 (определение суммы всех кислых газов и водорода) и хроматографе CROM-4 (для расчета весовых процентов при анализе близкокипящих соединений, соответствующих одному гомологическому ряду). Разделение вели на силикагелевой колонке длиной 3 м, диаметром 0,35 мм, скорость газа-носителя

(гелий) 25 мл/мин; температура термостата 200 °С; испарителя 100 °С; чувствительность катарометра 175 пА, программирование температуры 12 °С в минуту. Обработку хроматограмм проводили методом нормировки площадей. Из полученного дистиллята коксования выделяли воду, фракции НК–200 °С и > 200 °С. Для полученных фракций (НК – 200 °С) коксования каждого образца отходов определяли йодное число. Для воды определяли рН. Для каждого вида сырья проводили по три эксперимента, отклонение состава полученных продуктов от средней величины для различных компонентов не превышало 5 %.

Фракцию > 200 °С коксования смеси ТБО с полугудроном в соотношении 4:1 направляли в качестве сырья на лабораторную установку периодического окисления воздухом для получения битума. Лабораторная установка аналогична установке периодического коксования, отличаясь подачей воздуха в низ реактора. Проводили три эксперимента, отклонение выхода каждого из полученных продуктов (дистиллят, битум, газ + потери) от соответствующих средних величин не превышало 6,5 %. Для дистиллята процесса получения битума были определены относительная плотность, кинематическая вязкость при 20 °С, температура застывания, дизельный индекс, температура вспышки в закрытом тигле. Для полученного битума определяли пенетрацию и температуру размягчения.

Результаты и обсуждение

Коксование как метод переработки бытовых отходов. Твердые бытовые отходы, рассматриваемые в данной работе, имеют органическое происхождение. Образование кокса происходит в результате ряда последовательных реакций конденсации органических молекул, дающих продукты с увеличивающейся молекулярной массой и ароматизацией. В общем, процесс коксования жидкого сырья можно описать схемой, предложенной в работе [8], упрощенно представленной на рисунке 1.

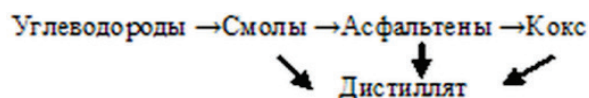


Рис. 1. Схема процесса коксования жидкого углеводородного сырья

Механизм термических реакций хорошо описан, например, в работах [7, 8, 11]. Термолиз нефтяного сырья в жидкой фазе протекает через последовательные или параллельно-последовательные стадии образования и расщепления масел и смол (промежуточных продуктов) с последующим уплотнением их до асфальтенов. Побочными продуктами деструкции жидких углеводородов являются летучие углеводороды, выделение которых сопровождает все протекающие процессы.

Термическая переработка бытовых органических отходов в смеси с нефтяными остатками в той или иной степени напоминает процесс непрерывного коксования, где твердые отходы будут являться центрами коксования и одновременно поверхностью, с которой осуществляется испарение, и, как следствие, будет происходить уплотнение жидких углеводородов. Коксование представляет сложный, нестационарный, многофакторный, гетерогенный и гетерофазный диффузионный процесс со специфическим гидродинамическим, массообменным и тепловым режимом.

ТБО как составляющая часть сырья для процесса термолиза так же разнообразны по своему углеводородному и элементному составу, как и нефтяные. Состав отходов, являющихся сырьем процесса термодеструкции, будет влиять на материальный баланс процесса. Глубину протекания термолиза определяют температурный диапазон нагрева сырьевой смеси, скорость и время нагрева. Эти параметры должны обеспечить протекание первичных реакций деструкции и уплотнения, а также реакций деструкции и уплотнения вторично образовавшихся продуктов.

Материальный баланс коксования ТБО. Рисунок 2 демонстрирует результаты коксования полугудрона в смеси с различными образцами ТБО, показывающие, что выбранный температурный режим проведения процесса обеспечил глубину его протекания. Выход продуктов коксования зависит от состава отходов. При термолизе резины, пластиковых бутылок и медицинских шприцов выход твердого остатка значительно выше, и газообразование снижено по отношению к выходу продуктов от термолиза бумаги и пищевых отходов, так как в состав как авторезины, так и пластиковых отходов входит концентрированный полимерный углеводород, что, прежде всего, сказывается на увеличении выхода твердого остатка. В случае с термолизом бумаги и пищевых отходов, где в качестве основы выступают в основном целлюлоза и растительная клетчатка, чрезмерное образование твердого остатка невозможно, что подтверждено результатами, приведенными на рисунке. В экспериментах с этим сырьем отмечено обильное выделение газа.

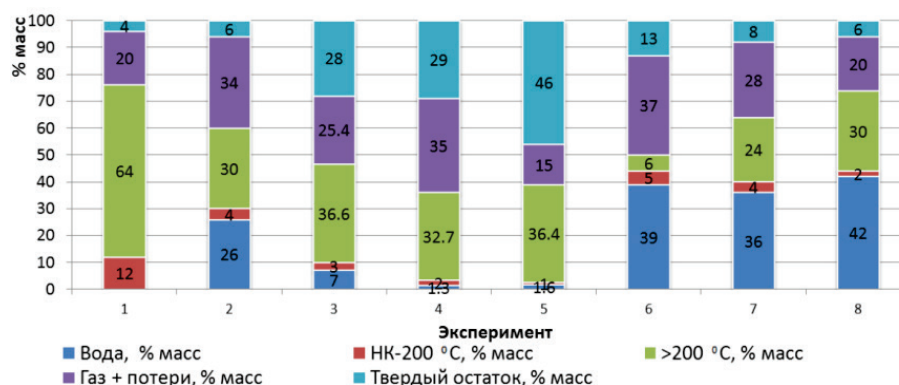


Рис. 2. **Материальный баланс коксования ТБО** (сырье процесса: 1 — полугудрон; 2 и 7 — соотношение 1:4:2 — полугудрон + бумага; 3 — полугудрон + резина (отработанные шины); 4 — полугудрон + пластик (бутылки); 5 — полугудрон + пластик (шприцы); 6 — полугудрон + пищевые отходы; 7 — полугудрон + смесь ТБО; 8 — фракция НК-200 °C из эксперимента № 7 + смесь ТБО)

Отдельного внимания заслуживают эксперименты с использованием в качестве сырья термолиза смеси ТБО и полугудрона и смеси ТБО и рециркулята. Сырье коксования формировали с использованием каждого из отходов в равных количествах. В качестве рециркулята вместо полугудрона использовали жидкую углеводородную фракцию > 200 °C, выделенную из продуктов термолиза смеси ТБО и полугудрона. Близкие значения количественного выхода продуктов коксования для этих экспериментов приводят к выводу о том, что при выбранном соотношении твердых и жидких фаз качество используемой жидкой фазы не влияет на выход продуктов термолиза. Ранее в работах [12, 13]

было продемонстрировано получение синергетического эффекта при совместном термоллизе отдельных видов отходов, в том числе с нефтяными остатками [12]. Полученные нами результаты показывают целесообразность совместного коксования разных видов органических отходов и их смесей с полугудроном. Пищевые отходы могут входить в сырье коксования, однако их высокое содержание будет увеличивать выход газообразных продуктов и снижать выход жидких углеводородных фракций.

Во всех экспериментах одним из продуктов термоллиза является вода. В случаях коксования бумаги или пищевых отходов это легко объяснимо, поскольку вода присутствует в составе данных отходов и в эксперименте с пищевыми отходами ее выход является максимальным и составляет до 78 % масс. на жидкий продукт термоллиза и до 39 % масс. в целом на сырье коксования по данному эксперименту. При коксовании пластиковых отходов и авторезины появление воды в составе продуктов термоллиза объясняется деструкцией высокомолекулярных соединений, входящих в состав сырья данных видов ТБО. Содержание оксипроизводных углеводов в исходном сырье влияет на химизм процесса термического разложения, об этом можно судить по результатам исследования. Это существенно не влияет на технологию процесса коксования, интервал оптимальных значений температуры и времени для различного типа сырья не меняется.

Предлагаемый нами подход, в отличие от результатов исследования [14], где процесс коксования был использован для переработки пластиковых отходов с получением кокса, смолы и газа, позволяет получить из смешанных органических отходов жидкие продукты, соответствующие фракциям перегонки нефти.

Анализ продуктов жидкофазного термоллиза бытовых отходов. Газ коксования, имеющий запах копчености, при поджоге на выходе из реактора обеспечивал равномерное горение. Результаты анализа приведены на рисунке 3.

Дистиллят коксования — визуально непрозрачная жидкость темного цвета. В результате отстаивания по высоте дистиллята происходит расслоение слоев нефтепродукта и воды. Низкие значения pH говорят об образовании в процессе коксования низкомолекулярных водорастворимых кислот, что потребует защелачивания воды для использования на технологические нужды.

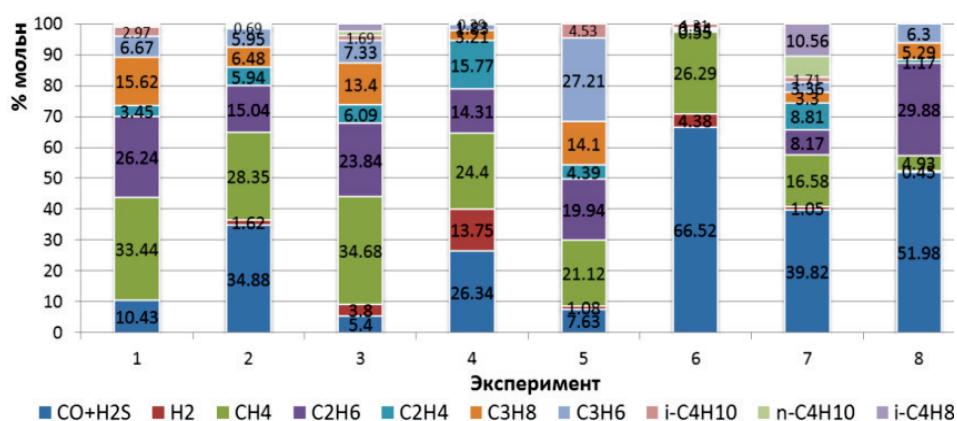


Рис. 3. Состав газообразных продуктов термоллиза органических ТБО (состав сырья идентичен рис. 2)

В таблице 1 приведены полученные значения рН для водной части дистиллята и йодного числа углеводородной фракции НК–200 °С. Для фракции, полученной при коксовании бумаги, был определен следующий групповой состав, % масс: ароматические углеводороды (35,7), нафтены (15,5), парафины (48,9). Твердый остаток — темное хрупкое и сыпучее вещество — содержал 93–95 % масс. углерода, 0,44–0,72 % масс серы, зольность составляла 0,2–0,3 % масс. Твердый остаток, по внешнему виду повторяющий форму образца отходов, который использовался в качестве сырья для коксования, при поджоге обеспечивает равномерное бездымное горение.

Таблица 1

Результаты анализа дистиллята термолиза бытовых отходов

Номер опыта	Сырье процесса, соотношение полугудрон:ТБО (1:4 по массе)	НК–200 °С,		Вода	
				% масс. на сырье	рН
1	Полугудрон		12,0	15,6	—
2	Полугудрон	Бумага	4,0	17,1	12,0
3	Полугудрон	Резина	3,0	29,0	7,0
4	Полугудрон	Пластик (бутылки)	2,0	4,7	1,3
5	Полугудрон	Пластик (шприцы)	1,0	9,9	1,6
6	Полугудрон	Пищевые	5,0	4,6	39,0
7	Полугудрон	Смесь ТБО	4,0	20,5	36,0
8	Фракция НК–200 °С из опыта № 7	Смесь ТБО	2,0	16,1	42,0

В результате проведения эксперимента по получению битума из фракции > 200 °С термолиза смеси бытовых отходов с полугудроном в соотношении 4:1 были получены битум, углеводородный дистиллят и газ.

Материальный баланс процесса представлен в таблице 2. Таблица 3 демонстрирует результаты определения качества полученного дистиллята.

Пенетрация полученного образца битума составила 14 (при 25 °С, при 0,1 мм), температура размягчения — 102 °С. Общий материальный баланс процесса коксования органических ТБО представлен на рисунке 4.

Таблица 2

Материальный баланс процесса получения битума из фракции > 200 °С термолиза смеси бытовых отходов с полугудроном (соотношение 4:1)

Статья баланса	На сырье процесса коксования, % масс.	На сырье процесса получения битума, % масс.
Сырье	24,00	100,00
Продукты		
- Дистиллят	14,60	60,83
- Битум	7,40	30,84
- Газ + потери	2,00	8,33
Итого	24,00	100,00

Качество дистиллята процесса получения битума из фракции > 200 °С термолiza смеси бытовых отходов с полугудроном (соотношение 4:1)

Показатель качества	Значение показателя
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с	57,57
Температура застывания, °С	–18
Относительная плотность	0,8975
Дизельный индекс	18
Температура вспышки	112,0

На основании полученных результатов качества продуктов термолiza можно рассматривать их различные варианты использования. Наилучшее применение для углеводородного газа — использование в качестве топливного газа для поддержания температурного режима процесса коксования.

Углеводородный дистиллят в первую очередь может использоваться без фракционирования в качестве печного топлива для поддержания температурного режима процесса коксования. Кроме этого, данный продукт может быть использован в качестве сырья или компонента сырьевой смеси для процессов гидроочистки и каталитического крекинга, процесса получения битумов. Возможно добавление данного продукта в количестве 1–5 % к товарному дизельному топливу, получаемому на нефтеперерабатывающих заводах.

Ввиду низкого содержания золы в твердом остатке, с учетом того, что содержание в нем углерода составляет 93–95 %, его целесообразно использовать в качестве твердого топлива. После отделения воды из смеси жидкими углеводородами отстоем и ее зашлакачивания для нейтрализации кислых примесей она может использоваться на технологические нужды.

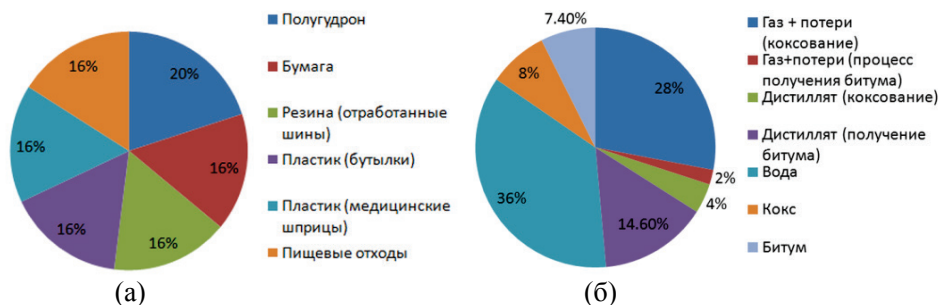


Рис. 4. Суммарный материальный баланс переработки смеси органических ТБО:
(а) — сырье; (б) — продукты

Для практической реализации предлагаемого подхода может быть использована хорошо известная технология замедленного коксования, с известным энергетическим балансом, применяемая на многих нефтеперерабатывающих заводах для получения кокса [11], но не используемая до настоящего времени с целью переработки органических отходов. Технология процесса, не требующего подвода энергии извне, при использовании разного сырья, состав которого меняется на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) в достаточно широких пределах, не требует изменений при переработке несортируемых органических отходов. Таким образом, для переработки несортированные органические отходы необхо-

димо транспортировать с мест временного хранения на НПЗ, размещать на складе и затем направлять на переработку коксованием совместно с нефтяными остатками.

Выводы

Проведенные исследования позволили сделать вывод о возможности применения коксования для переработки несортированных органических отходов и разработать основы технологии переработки отходов, основанной на коксовании смеси твердых бытовых отходов органического происхождения и жидких некондиционных нефтепродуктов. Разработанная технология низкотемпературной переработки ТБО является экологически безопасной и не требует внешних энергетических затрат, так как необходимая для протекания процесса энергия вырабатывается за счет сжигания газа, получаемого при коксовании отходов. Отличие предлагаемого метода от большинства применяемых методов переработки ТБО, позволяющих получать в основном газообразные продукты, в том, что получаемые продукты соответствуют фракциям прямой перегонки нефти (бензиновая, дизельная фракция, мазут) и могут перерабатываться в смеси с прямыми фракциями, получаемыми из нефти, в стандартных процессах нефтепереработки в товарные нефтепродукты — бензин, дизельное топливо, котельное топливо и, при необходимости, битум. Использование предлагаемого метода позволяет вместо строительства специализированных мусороперерабатывающих заводов перерабатывать органические бытовые отходы, используя их в качестве добавки в составе сырья на нефтеперерабатывающих предприятиях. В результате сохраняется ассортимент нефтяных топлив при значительной экономии нефти. Поскольку в качестве сырья коксования могут быть использованы любые отходы органического состава, предлагаемая технология может в дальнейшем применяться для переработки как бытовых, так и промышленных отходов.

Библиографический список

1. Combustion, pyrolysis and char CO₂-gasification characteristics of hydrothermal carbonization solid fuel from municipal solid wastes / Y. Lin [et al.] // *Fuel*. – 2016. – Vol. 181. – P. 905–915. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.05.031
2. Motasemi F., Afzal M. T. A review on the microwave-assisted pyrolysis technique // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – Vol. 28. – P. 317–330. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.008
3. Arena U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review // *Waste Management*. – 2012. – Vol. 32. – P. 625–639. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.025
4. Biomass conversion through torrefaction / A. Nordin [et al.] // *Technologies for Converting Biomass to Useful Energy*. – New York: CRC Press, 2013. – P. 217–244.
5. Clean solid biofuel production from high moisture content waste biomass employing hydrothermal treatment / P. Zhao [et al.] // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 131. – P. 345–367. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.06.038
6. Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. – 2nd ed. – USA: Elsevier Inc., 2013. – 548 p.
7. Магарил Р. З. Теоретические основы химических процессов переработки нефти. М.: КДУ, 2010. – 280 с.
8. Магарил Р. З. Механизм и кинетика гомогенных термохимических превращений углеводородов. – М.: Химия, 1976. – 224 с.
9. Трушкова Л. В., Дроздова С. Н. Методические указания по лабораторному практикуму «Коксование тяжелых нефтяных остатков». – Тюмень: ТюмГНГУ, 1993. – 5 с.
10. Практикум по технологии переработки нефти / Под ред. Е. В. Смидовича, И. П. Лукшевича. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1978. – 288 с.
11. Ахметов С. А. Технология глубокой переработки нефти и газа. Уфа: Гилем, 2002. 672 с.
12. Siddiqui M. N., Redhwi H. H. Catalytic coprocessing of waste plastics and petroleum residue into liquid fuel oils // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2009. – Vol. 86. – P. 141–147. DOI: 10.1016/j.jaap.2009.05.002

13. Plastics to fuel: a review / B. Kunwar [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 54. – P. 421–428. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.015

14. Disposal of Waste Plastics With Traditional Coking Process / J.-J Cai [et al.] // Journal of Iron and Steel Research International. – 2006. – Vol. 13. – P. 5–9. DOI: 10.1016/S1006-706X(06)60016-2

References

1. Lin, Y., Ma, X., Peng, X., Yu, Z., Fang, S., & Fan, Y. (2016). Combustion, pyrolysis and char CO₂-gasification characteristics of hydrothermal carbonization solid fuel from municipal solid wastes. *Fuel*, 181, pp. 905-915. (In English). DOI: 10.1016/j.fuel.2016.05.031
2. Motasemi, F., & Afzal, M. T. (2013). A review on the microwave-assisted pyrolysis technique. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, pp. 317-330. (In English). DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.008
3. Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. *Waste Management*, 32, pp. 625-639. (In English). DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.025
4. Nordin, A., Pommer, L., Nordwaeger, M., & Olofsson, I. (2013). Biomass conversion through torrefaction. *Technologies for Converting Biomass to Useful Energy*. New York, CRC Press, pp. 217-244. (In English).
5. Zhao, P., Shen, Y., Ge, S., Chen, Z., & Yoshikawa, K. (2014). Clean solid biofuel production from high moisture content waste biomass employing hydrothermal treatment. *Applied Energy*, 131, pp. 345-367. (In English). DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.06.038
6. Basu, P. (2013). Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. 2nd edition. USA, Elsevier Inc., 548 p. (In English).
7. Magaril R. Z. (2010). *Teoreticheskie osnovy khimicheskikh protsessov pererabotki nefti*. Moscow, KDU Publ., 2010. 280 p. (In Russian).
8. Magaril, R. Z. (1976). *Mekhanizm i kinetika gomogennykh termokhimicheskikh prevrashcheniy uglevodorodov*. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 224 p. (In Russian).
9. Trushkova, L. V., Drozdova, S. N. (1993). *Metodicheskie ukazaniya po laboratornomu praktikumu "Koksovanie tyazhelykh neftyanykh ostatkov"*. Tyumen, TyumGNGU Publ., 5 p. (In Russian).
10. Smidovich, E. V., & Lukashevich, I. V. (Eds). (1978). *Praktikum po tekhnologii pererabotki nefti*. 3rd edition, revised and expanded. Moscow, Khimiya Publ., 228 p. (In Russian).
11. Akhmetov, S. A. (2002). *Tekhnologiya glubokoy pererabotki nefti i gaza*. Ufa, Gilem Publ., 672 p. (In Russian).
12. Siddiqui, M. N., & Redhwi, H. H. (2009). Catalytic coprocessing of waste plastics and petroleum residue into liquid fuel oils. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 86, pp. 141-147. (In English). DOI: 10.1016/j.jaap.2009.05.002
13. Kunwar, B., Cheng, H. N., Chandrashekar, S. R., & Sharma, B. K. (2016). Plastics to fuel: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, pp. 421-428. (In English). DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.015
14. Cai, J.-J, Yu, G.-W, Liao, H.-Q, Qian, K., Zhao, P. & He, Y.-B. (2006). Disposal of waste plastics with traditional coking process. *Journal of Iron and Steel Research International*, 13, pp. 5-9. (In English). DOI: 10.1016/S1006-706X(06)60016-2

Сведения об авторах

Пауков Алексей Николаевич, доцент кафедры переработки нефти и газа, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: al.paukov@gmail.com

Магарил Ромен Зеликович, д. т. н., профессор-консультант кафедры переработки нефти и газа, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Магарил Елена Роменовна, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой экономики природопользования, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Information about authors

Alexey N. Paukov, Associate Professor at the Department of Oil and Gas Processing, Industrial University of Tyumen, e-mail: al.paukov@gmail.com

Romen Z. Magaril, Doctor of Engineering, Professor-Consultant at the Department of Oil and Gas Processing, Industrial University of Tyumen

Elena R. Magaril, Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of the Environmental Economics, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg