

ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ АКТИВАЦИИ БЕНЗИНОВОЙ ФРАКЦИИ НА ВЫХОД ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА

А.И. Николаев, Б.В. Пешнев, М.Х.И. Алхамеди, А.Н. Королев

Александр Игоревич Николаев (ORCID 0000-0001-8594-2985)*, Борис Владимирович Пешнев (ORCID 0000-0002-0507-2754), Муатаз Х.И. Алхамеди (ORCID 0009-0003-3738-364X), Александр Николаевич Королев (ORCID 0000-0003-2709-3342)

Кафедра технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, МИРЭА - Российский технологический университет, просп. Вернадского, 78, Москва, Российская Федерация, 119454

E-mail: nikolaev_a@mirea.ru*

Одними из наиболее важных полупродуктов нефтехимической промышленности являются этилен и пропилен. Основным способом получения этих продуктов является пиролиз углеводородного сырья. Активация сырья, основанная на явлении кавитации, может способствовать интенсификации технологического процесса получения этилена и пропилена. Целью данной работы являлось исследование влияния предварительной активации бензиновой фракции нефти на выход газа пиролиза и содержание в нем низших олефинов. Активацию сырья реализовывали в гомогенизаторе высокого давления марки Донор-2. Пиролиз углеводородов проводили в установке проточного типа. В ходе исследований, методом газо-адсорбционной хроматографии, определялся углеводородный состав газа пиролиза, характеристики сырья и жидких продуктов пиролиза (фракционный состав, плотность, показатель преломления). Проведенные исследования показали, что при пиролизе исходной и активированной бензиновой фракции повышение температуры и времени контакта сопровождалось увеличением выхода газа. Установлено, что при проведении пиролиза исходного и активированного сырья при времени контакта 0,5 с и температуре 600 °С различие в выходе газа составляло 1% об., при том же времени контакта, но при температуре 800 °С различие в выходе газа было 6% об. (50% об. у исходного сырья и 56% об. у активированного). Следует отметить, что активация сырья способствует увеличению выхода газа пиролиза. Однако различия в выходах газа у исходного и активированного сырья возрастают с ростом температуры процесса и времени пребывания сырья в реакционной зоне. Наименьшие различия отмечались при температуре 600 °С и наименьшем времени пребывания сырья в реакционной зоне (0,5 с), наибольшие при 800 °С и времени 2,5 с. Активация сырья отражается не только на выходе газов пиролиза, но и на их составе. В газах значительно увеличилось содержание низших олефинов. Как и в случае с выходом газа, повышение температуры процесса увеличивало эффект активации сырья. Изменение времени контакта в сторону его повышения способствовало снижению наблюдаемого эффекта. Например, в составе газа пиролиза, полученного при времени контакта 2,5 с и температуре 800 °С, концентрация этилена и пропилена снизилась до ~6% и ~1% соответственно. Увеличение содержания бутенов в газах пиролиза после активации сырья было незначительно и не превышало 2%. Активация сырья оказывает влияние и на изменение выхода жидких продуктов пиролиза. Их количество снижается. Влияния активации сырья на выход продуктов уплотнения не установлено. Представленные в работе результаты исследований подтверждают высказанное авторами и рядом исследователей предположение об активации в молекулах углеводородов связей углерод–углерод при протекании кавитации. Это в сочетании с последующим термическим воздействием на активированное сырье будет способствовать протеканию химических процессов, что в приложении к процессу пиролиза будет отражаться на повышении выхода газообразных продуктов процесса со значительным увеличением в них содержания низших олефинов (этилена, пропилена). Применение данного подхода в промышленности для подготовки сырья к пиролизу позволит повысить мощность существующих производств низших олефинов.

Ключевые слова: кавитационная активация бензиновой фракции, пиролиз, газ пиролиза, жидкие продукты пиролиза

THE EFFECT OF CAVITATION ACTIVATION OF THE GASOLINE FRACTION ON THE YIELD OF PYROLYSIS PRODUCTS

A.I. Nikolaev, B.V. Peshnev, M.Kh.I. Alhamedi, A.N. Korolev

Alexander I. Nikolaev (ORCID 0000-0001-8594-2985)*, Boris V. Peshnev (ORCID 0000-0002-0507-2754), Muataz Kh.I. Alhamedi (ORCID 0009-0003-3738-364X), Alexander N. Korolev (ORCID 0000-0003-2709-3342)
Department of Technology of Petrochemical Synthesis and Artificial Liquid Fuel named after A.N. Bashkirov, Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA - Russian Technological University, Vernadsky ave., 78, Moscow, 119454, Russia
E-mail: nikolaev_a@mirea.ru*

Ethylene and propylene are among the most important intermediates in the petrochemical industry. The main way to obtain these products is the pyrolysis of hydrocarbon feedstock. This activation, based on the phenomenon of cavitation, can contribute to the intensification of the technological process for the production of ethylene and propylene. The purpose of this work was to study the effect of pre-activation of the gasoline fraction of oil on the yield of lower olefins during pyrolysis. Raw materials were activated in a Donor-2 high-pressure homogenizer. The pyrolysis of hydrocarbons was carried out in a flow-type installation. In the course of research, by the method of gas-adsorption chromatography, the hydrocarbon composition of the pyrolysis gas, the characteristics of raw materials and liquid pyrolysis products (fractional composition, density, refractive index) were determined. The conducted studies showed that during the pyrolysis of the initial and activated gasoline fraction, an increase in temperature and contact time was accompanied by an increase in gas yield. It has been established that during the pyrolysis of the initial and activated raw materials with a residence time of 0.5 s and a temperature of 600 °C, the difference in gas output was 1%vol., at the same contact time. But at a temperature of 800 °C, the difference in gas output was 6%vol. (50% vol. for the feedstock and 56%vol. for the activated one). It should be noted that the activation of raw materials contributes to an increase in the yield of pyrolysis gas. However, the differences in the gas yields of the initial and activated raw materials increase with an increase in the process temperature and the residence time of the raw material in the reaction zone. The smallest differences were noted at a temperature of 600 °C and the shortest residence time of the raw material in the reaction zone (0.5 s), the largest at 800 °C and a time of 2.5 s. The activation of raw materials is reflected not only in the output of pyrolysis gases, but also in their composition. The content of lower olefins in gases increased significantly. As in the case of gas release, increasing the process temperature increased the effect of feed activation. Changing the residence time in the direction of its increase contributed to the decrease in the observed effect. For example, in the composition of the pyrolysis gas obtained with a residence time of 2.5 s and a temperature of 800 °C, the concentration of ethylene and propylene decreased to ~ 6% and ~ 1%, respectively. The increase in the content of butenes in the pyrolysis gases after the activation of the raw material was insignificant and did not exceed 2%. Activation of raw materials also affects the change in the yield of liquid pyrolysis products. Their number is decreasing. The effect of raw material activation on the yield of compaction products has not been established. The research results presented in this paper confirm the assumption made by the authors and a number of researchers about the activation of carbon-carbon bonds in hydrocarbon molecules during cavitation. This, in combination with the subsequent thermal effect on the activated raw material, will contribute to the occurrence of chemical processes, which, when applied to the pyrolysis process, will be reflected in an increase in the yield of gaseous products of the process with a significant increase in the content of lower olefins (ethylene, propylene). The application of this approach in industry for the preparation of raw materials for pyrolysis will increase the capacity of existing production of lower olefins.

Key words: cavitation activation of gasoline fraction, pyrolysis, pyrolysis gas, liquid pyrolysis purges

Для цитирования:

Николаев А.И., Пешнев Б.В., Алхамеди М.Х.И., Королев А.Н. Влияние кавитационной активации бензиновой фракции на выход продуктов пиролиза. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 8 С. 99–105. DOI: 10.6060/ivkkt.20236608.6812.

For citation:

Nikolaev A.I., Peshnev B.V., Alhamedi M.Kh.I., Korolev A.N. The effect of cavitation activation of the gasoline fraction on the yield of pyrolysis products. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 8. P. 99–105. DOI: 10.6060/ivkkt.20236608.6812.

ВВЕДЕНИЕ

В химической промышленности одним из наиболее востребованных мономеров является этилен. На его основе производятся полиэтилен, окись этилена, винилхлорид. Именно по объемам производства этилена судят о модели развития экономики – сырьевой, или с высокой добавленной стоимостью. На сегодняшний день мировое производство этилена оценивается на уровне 150 млн. т/г. Другим, не менее важным полупродуктом является пропилен, объем производства которого оценивают в 70–80 млн. т/г., при этом среднегодовые темпы роста спроса на эти низшие олефины оценивают в 4–5% [1, 2].

Производство этилена и пропилена базируется на пиролизе бензиновых фракций нефти, этана, пропан-бутановой смеси, сухого отбензиненного газа [2–5]. Прирост мировых мощностей по производству этилена и пропилена составляет 2–3% в год. Учитывая, что увеличение спроса на низшие олефины превышает прирост вводимых мощностей и учитывая, что доля продуктов газоперерабатывающей отрасли в сырьевой базе процесса пиролиза составляет уже 48% [1], ясно, что экстенсивный путь наращивания мощностей производства этилена и пропилена бесперспективен. Нужны новые, альтернативные решения.

Примером такого решения может быть предварительная активация жидкого углеводородного сырья [6–9]. В качестве такой активации может выступить явление кавитации, возникшее в результате акустических, ультразвуковых, гидродинамических и др. волновых воздействий. Так, в работе [10] высказывается предположение об активации связей углерод-углерод при гидроакустическом воздействии на нефть. При последующем термическом воздействии такие активированные связи разрушаются с образованием углеводородов меньшей молекулярной массы. Аналогичные предположения высказывали и авторы работ [11, 12],

где кавитация возникала в гидродинамическом потоке нефтепродуктов. Предположение об активации С-С связей при кавитационной обработке согласуется с результатами публикаций [13, 14]. Авторы работы [13] фиксировали увеличение выхода газа и повышение содержания в нем непредельных углеводородов при каталитическом крекинге вакуумного газойля после его активации, а в работе [14] указывается на значительное увеличение выхода бензиновых фракций при замедленном коксовании активированного мазута.

В основной массе публикаций, посвященных использованию явления кавитации в нефтедобыче и нефтепереработке, рассматриваются сырые нефти или тяжелые нефтяные фракции. Однако, в работе [15] показано, что и у дизельной фракции, в результате ее кавитационной обработки, изменяются характеристики. Это, в совокупности с данными работ [7–17], позволяло предполагать, что активация бензиновой фракции перед процессом пиролиза позволит увеличить выход низших олефинов. Целью данной работы являлось исследование предварительной активации бензиновой фракции нефти на выход низших олефинов в процессе пиролиза.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Активацию сырья проводили в гомогенизаторе высокого давления марки Донор-2* [6].

Сырье поступало в камеру высокого давления гомогенизатора, где происходило его сжатие до 40 МПа, а далее, через диффузор, оно вытеснялось в камеру низкого давления. В процессе прохождения через диффузор скорость потока сырья возрастала, давление в потоке снижалось, что приводило к выделению в газовую фазу низкокипящих компонентов сырья (возникновению разрывов сплошности потока). При поступлении сырья в камеру низкого давления скорость потока снижалась,

* Авторы благодарны д.б.н., проф. Воробьеву Сергею Ивановичу за предоставленное для исследований оборудование

давление в объеме потока возрастало, что приводило к схлопыванию образовавшихся пузырьков (возникло явление кавитации). В данной работе сырье подвергалось 5 актам такого воздействия.

Пиролиз углеводородов проводили в проточной установке, схема которой приведена на рис. 1.

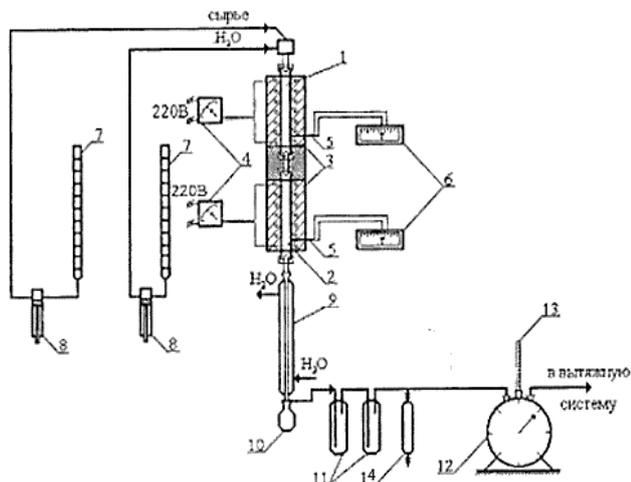


Рис. 1. Схема лабораторной установки пиролиза 1 - испаритель, 2 - реактор, 3 - электропечь, 4 - ЛАТР, 5 - термопара, 6 - потенциометр, 7 - бюретка, 8 - насос, 9 - водяной холодильник, 10 - приемник для пироконденсата, 11 - ловушка, 12 - газовый счетчик, 13 - термометр, 14 - газовая пипетка
 Fig. 1. Scheme of a laboratory pyrolysis unit 1 - evaporator, 2 - reactor, 3 - electric furnace, 4 - LАTR, 5 - thermocouple, 6 - potentiometer, 7 - burette, 8 - pump, 9 - water cooler, 10 - receiver for pyrocondensate, 11 - trap, 12 - gas counter, 13 - thermometer, 14 - gas pipette

Сырье (исходное или непосредственно после активации) и вода в соотношении 1:1 насосами (8) из мерных бюреток (7) подавались в испаритель (1). Расход сырья подбирался таким образом, чтобы обеспечить время пребывания сырья в реакторе от 0,5 до 2 с. В испарителе сырье и вода нагревались до температуры 250 °С, а затем поступали в реактор пиролиза (2), обогреваемый электрической печью (3). Температура в реакторе (от 600 °С до 800 °С) контролировалась хромель-алюмелевой термопарой (5), работающей в комплекте со вторичным прибором (6). Далее продукты пиролиза поступали в холодильник (9), после чего они собирались в приемниках (11). Объем газообразных продуктов фиксировался газовым счетчиком марки ГСБ-400 (12). Представленные ниже значения выходов продуктов пиролиза рассчитаны на углеводородное сырье.

Углеводородный состав газа определялся методом газо-адсорбционной хроматографии на хроматографе марки 3700 [18]. Детектор – катарометр, ток моста детектора 90 мА. Расход газа-носи-

теля (азота) составлял 25 мл/мин. Хроматографическая фаза - α -Al₂O₃ фракцией 0,15-0,25 мм, промотированный 5% раствором NaOH. Длина колонки 7 м. Температура термостата колонок 70 °С.

Фракционный состав сырья определялся на аппарате марки АРНП-1 [19]. Плотности сырья и жидких продуктов устанавливали, используя пикнометрический метод, для определения показателя преломления применяли рефрактометр марки ИРФ-22 [20].

В качестве исходного сырья использовалась прямогонная бензиновая фракция, предоставленная АО «Газпромнефть-МНПЗ». Характеристики сырья до и после активации приведены в табл. 1.

Таблица 1
 Характеристики исходного и активированного сырья
 Table 1. Characteristics of the original and activated raw materials

Характеристика	Бензиновая фракция	
	исходная	активированная
Плотность (20 °С), кг/м ³	711,2	704,8
Температура, °С:		
начала кипения	40	34
выкипания 10 %	71	60
выкипания 30 %	96	84
выкипания 50 %	116	104
выкипания 70 %	141	125
выкипания 90 %	186	174
конца кипения	211	195
Показатель преломления	1,4345	1,4185

Из данных, представленных в табл. 1, видно, что активация сырья привела к снижению его плотности, показателя преломления, изменению фракционного состава (температур выкипания фракций) и снижению среднеобъемной температуры кипения со 125,5 °С до 114,5 °С. Эти изменения соответствуют установленным ранее для светлых фракций нефти [12]. Такие изменения характеристик сырья, согласно [3], позволяли предполагать увеличение выхода газа и повышение содержания в нем этилена и пропилена.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние температуры, времени контакта и предварительной активации на выход газов пиролиза показано на рис. 2.

Во всех случаях повышение температуры и времени контакта сопровождалось увеличением выхода газа. Активация сырья также привела к увеличению выхода газа, что особенно заметно при высоких температурах и больших временах контакта. Важно отметить, что влияние активации на изменение выхода газа по-разному проявляется

при различных температурах и временах контакта. Это позволяет говорить о том, что увеличение выхода газа связано активацией С-С связей сырья в результате кавитационного воздействия, а не со снижением плотности сырья.

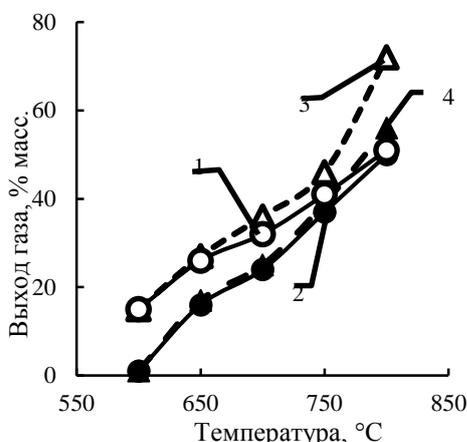


Рис. 2. Влияние температуры, времени контакта и активации на выход газа пиролиза 1 - исходное сырье, время контакта 2,5 с; 2 - исходное сырье, время контакта 0,5 с; 3 - активированное сырье, время контакта 2,5 с; 4 - активированное сырье, время контакта 0,5 с

Fig. 2. Influence of temperature, contact time and activation on the pyrolysis gas yield 1 - feedstock, residence time 2.5 s; 2 - feedstock, residence time 0.5 s; 3 - activated raw material, residence time 2.5 s; 4 - activated raw material, residence time 0.5 s

Активация сырья отразилась не только на выходе газов пиролиза, но и на их составе. В газах значительно увеличилось содержание низших олефинов (рис. 3).

Как и в случае с выходом газа, повышение температуры процесса увеличивало эффект активации сырья. Но, при этом, увеличение времени контакта этот эффект снижало. Так, при времени контакта 2,5 с. различия в содержании этилена в газах пиролиза исходного и активированного сырья сократились до ~ 6%, а пропилена до ~ 1% (температура 800 °С). Увеличение содержания бутенов в газах пиролиза после активации сырья было незначительно и не превышало 2%.

Содержание водорода в отходящих газах после активации сырья снизилось на ~ 5%. Существенного влияния активации на содержание в газах пиролиза алканов C₃-C₄ не установлено. Влияние активации на содержание в газах пиролиза метана и этана становилось заметно для температур 650 °С и выше. При этом оно возрастало по мере повышения температуры и снижалось с увеличением времени контакта.

Влияние активации сырья на выход жидких продуктов пиролиза (в пересчете на углеводороды) показано в табл. 2 и 3.

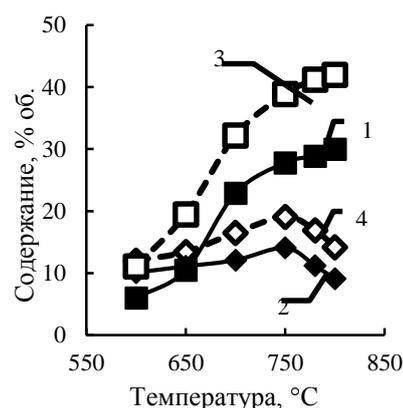


Рис. 3. Влияние активации сырья на содержание в газах пиролиза низших олефинов. Время контакта - 0,5 с 1 - исходное сырье, содержание этилена, 2 - исходное сырье, содержание пропилена, 3 - активированное сырье, содержание этилена, 4 - активированное сырье, содержание пропилена

Fig. 3. Influence of feedstock activation on the content of lower olefins in pyrolysis gases. Contact time - 0.5 s 1 - feedstock, ethylene content, 2 - feedstock, propylene content, 3 - activated feedstock, ethylene content, 4 - activated feedstock, propylene content

Таблица 2

Выход жидких продуктов (% масс.) при пиролизе исходного сырья
Table 2. Yield of liquid products (% mass.) during pyrolysis of feedstock

Температура, °С	Время контакта, с			
	0,5	1,0	1,5	2,5
600	98,8	93,7	89,6	84,5
650	83,6	79,5	76,4	73,3
700	75,4	72,3	69,2	67,1
750	62,2	60,1	59	57,9
780	49,7	46,5	46	47,3
800	48,5	46,2	45,7	45,8

Таблица 3

Выход жидких продуктов (% масс.) при пиролизе активированного сырья
Table 3. Yield of liquid products (% mass.) during pyrolysis of activated raw materials

Температура, °С	Время контакта, с			
	0,5	1,0	1,5	2,5
600	98,9	93,8	89,7	84,6
650	82,7	78,5	75,5	72,4
700	74,5	70,3	66,3	63,2
750	60,3	57,2	55,1	53
780	43,8	38,6	36,1	28,4
800	42,6	36,3	33,8	24,9

Активация сырья влияет не только на выход жидких углеводородов пиролиза, но и на их характеристики. Так, в условиях этиленового ($T = 780$ °С, время контакта 1,0 с) режима работы установки [21] характеристики жидких углеводородов, полу-

ченных при пиролизе исходной фракции, были следующие: плотность 0,7698 г/см³, коэффициент рефракции 1,4454. При этом же режиме работы установки, но при использовании активированного сырья, значения этих характеристик снизились до 0,7682 г/см³ и 1,4412 соответственно. В условиях пропиленового (T = 750 °C, время контакта 0,5 с) режима работы установки [21] характеристики жидких углеводородов, полученных при пиролизе исходной фракции, были: плотность 0,7524 г/см³, коэффициент рефракции 1,4346. При этом же режиме работы установки, но с использованием активированного сырья, значения этих характеристик снизились до 0,7509 г/см³ и 1,4335 соответственно.

Влияния активации сырья на выход продуктов уплотнения (кокс) не установлено. Характеристики образовавшихся продуктов уплотнения в проведенных исследованиях не изучались.

ВЫВОДЫ

Представленные результаты подтверждают предположение об активации связей углерод-углерод в молекулах углеводородов при активации последних в гидродинамическом кавитационном режиме. Последующая термическая обработка активированного сырья (пиролиз) позволяет повысить выход газообразных продуктов и значительно увеличить содержание в них низших олефинов. Подобный подход может быть эффективно использован для наращивания мощностей производства низших олефинов.

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

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брагинский О.Б. // *НефтеГазХимия*. 2016. № 2. С. 14-22.
2. Бикчурина А.Р., Цивунина И.В. // *Вестн. технол. ун-та*. 2015. № 9. С. 137-139. DOI: 10.1007/s11839-015-0536-4.
3. Мухина Т.Н., Барабанов Н.Л., Бабаш С.Е. Пиролиз углеводородного сырья. М.: Химия. 1987. 240 с.
4. Вдовенко З.В., Петухова Н.Ю. // *Усп. в химии и хим. технологии*. 2011. № 9. С. 11-16.
5. Сафиуллина Д.А., Хуснутдинов И.Ш., Лыжина Н.В. // *Вестн. технол. ун-та*. 2017. № 21. С. 64-67.
6. Терентьева В.Б., Пешнев Б.В., Николаев А.И. // *Тонкие хим. технологии*. 2021. № 5. С. 390-398. DOI: 10.32362/2410-6593-2021-16-5-390-398.
7. Пешнев Б.В., Бурляева Е.В., Терентьева В.Б., Никишин Д.В., Николаев А.И., Андронов К.С. // *Тонкие хим. технологии*. 2022. № 17. С. 473-482. DOI: 10.32362/2410-6593-2022-17-6-473-482.
8. Николаев А.И., Пешнев Б.В., Алхамеди М.Х.И. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 7. С. 94-99. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6611.
9. Николаев А.И., Пешнев Б.В., Егорова Е.В. // *Тонкие хим. технологии*. 2022. №1. С. 30-38. DOI:10.32362/2410-6593-2022-17-1-30-38.
10. Винокуров В.А., Фролов В.И., Крестовников М.П., Лесин С.В., Шишкин Ю.Л. // *Нефтеперераб. и нефтехимия*. 2012. № 8. С. 3-8.
11. Торховский В.Н., Чижевская Е.В., Антонык С.Н., Николаев С.А., Воробьев С.И. // *Нетрадиционные природные ресурсы, инновационные технологии и продукты. Сб. научных трудов*. М.: РАН. 2016. № 23. С. 86-97.
12. Торховский В.Н., Воробьев С.И., Антонык С.Н., Егорова Е.В., Иванов С.В., Кравченко В.В., Городский С.Н. // *Нефтегаз. технологии*. 2015. № 2. С. 9-17.
13. Иванов С.В., Воробьев С.И., Торховский В.Н., Герзелев И.М. // *Вестн. МИТХТ*. 2013. № 3. С. 67-69.

REFERENCES

1. Braginsky O.B. // *Neftegazokhimiya*. 2016. N 2. P. 14-22 (in Russian).
2. Bikchurina A.R., Tsivunina I.V. // *Vest. Tekhnol. Un-ta*. 2015. N 9. P. 137-139 (in Russian). DOI: 10.1007/s11839-015-0536-4.
3. Mukhina T.N., Barabanov N.L., Babash S.E. Pyrolysis of hydrocarbon raw materials. M.: Khimiya. 1987. 240 p. (in Russian).
4. Vdovenko Z.V., Petukhova N.Yu. // *Usp. Khim. Khim. Tekhnol.* 2011. N 9. P. 11-16 (in Russian).
5. Safiullina D.A., Khusnutdinov I.Sh., Lyzhina N.V. // *Vest. Tekhnol. Univ.* 2017. N 21. P. 64-67 (in Russian).
6. Terent'eva V.B., Peshnev B.V., Nikolaev A.I. // *Tonk. Khim. Tekhnol.* 2021. N 5. P. 390-398 (in Russian). DOI:10.32362/2410-6593-2021-16-5-390-398.
7. Peshnev B.V., Burlyaeva E.V., Terent'eva V.B., Nikishin D.V., Nikolaev A.I., Andronov K.S. // *Tonk. Khim. Tekhnol.* 2022. N 17. P. 473-482 (in Russian). DOI:10.32362/2410-6593-2022-17-6-473-482.
8. Nikolaev A.I., Peshnev B.V., Alkhamedi M.Kh.I. // *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 7. P. 94-99 (in Russian). DOI:10.6060-ivkkt.20226507.6611.
9. Nikolaev A.I., Peshnev B.V., Egorova E.V. // *Tonk. Khim. tekhnol.* 2022. N 1. P. 30-38 (in Russian). DOI:10.32362/2410-6593-2022-17-1-30-38.
10. Vinokurov V.A., Frolov V.I., Krestovnikov M.P., Lesin S.V. // *Neftepererab. Neftekhim.* 2012. N 8. P. 3-8 (in Russian).
11. Torkhovskiy V.N., Chizhevskaya E.V., Antonyuk S.N., Nikolaev S.A., Vorobyov S.I. // *Non-traditional natural resources, innovative technologies and products. Sat. scientific works*. M.: RAN. 2016. N 23. P. 86-97 (in Russian).
12. Torkhovskiy V.N., Vorobyov S.I., Antonyuk S.N., Egorova E.V., Ivanov S.V., Kravchenko V.V., Gorodskiy S.N. // *Neftegaz. Tekhnol.* 2015. N 2. P. 9-17 (in Russian).
13. Ivanov S.V., Vorobyov S.I., Torkhovskiy V.N., Gerzeliev I.M. // *Vestn. MITKhT*. 2013. N 3. P. 67-69 (in Russian).

14. Терентьева В.Б., Николаев А.И., Пешнев Б.В. // *Тонкие хим. технологии*. 2019. № 1. С. 75-81. DOI: 10.32362/2410-6593-2019-14-1-75-81.
15. Терентьева В.Б., Николаев А.И., Пешнев Б.В., Конькова Н.А. // *Тонкие хим. технологии*. 2018. № 2. С. 51-55. DOI: 10.32362/2410-6593-2018-13-2-51-55.
16. Торховский В.Н., Воробьев С.И., Егорова Е.В., Иванов С.В., Городской С.Н. // *Тонкие хим. технологии*. 2013. № 8. С. 27-36.
17. Торховский В.Н., Воробьев С.И., Егорова Е.В., Антонюк С.Н., Городской С.Н., Иванов С.В. // *Тонкие хим. технологии*. 2014. № 9. С. 59-69.
18. Другов Ю. С., Родин А.А. Газохроматографический анализ природного газа. М.: БИНОМ. 2009. 174 с.
19. Шишов М.Г. Определение фракционного состава нефтяных топлив методом имитированной дистилляции. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2017. 26 с.
20. Кирсанов Ю.Г. Расчетные и графические методы определения свойств нефти и нефтепродуктов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2014. 136 с.
21. Масальский К.Е., Годик В.М. Пиролизные установки. М.: Химия. 1968. 143 с.
14. Terent'eva V.B., Nikolaev A.I., Peshnev B.V. // *Tonk. Khim. Tekhnol.* 2019. N 1. P. 75-81 (in Russian). DOI: 10.32362/2410-6593-2019-14-1-75-81.
15. Terent'eva V.B., Nikolaev A.I., Peshnev B.V., Kon'kova N.A. // *Tonk. Khim. Tekhnol.* 2018. N 2. P. 51-55 (in Russian). DOI: 10.32362/2410-6593-2018-13-2-51-55.
16. Torkhovskiy V.N., Vorobyov S.I., Egorova E.V., Ivanov S.V., Gorodskoy S.N. // *Tonk. Khim. Tekhnol.* 2013. N 8. P. 27-36 (in Russian).
17. Torkhovskiy V.N., Vorobyov S.I., Egorova E.V., Antonyuk S.N., Gorodskoy S.N., Ivanov S.V. // *Tonk. Khim. Tekhnol.* 2014. N 9. P. 59-69 (in Russian).
18. Drugov Yu.S., Rodin A.A. Gas chromatographic analysis of natural gas. M.: BINOM. 2009. 174 p. (in Russian).
19. Shishov M.G. Determination of the fractional composition of petroleum fuels by simulated distillation. Yekaterinburg: Izd-vo Ural. univ. 2017. 26 p. (in Russian).
20. Kirsanov Yu.G. Calculation and graphic methods for determining the properties of oil and oil products. Yekaterinburg: Izd-vo Ural. univ. 2014. 136 p. (in Russian).
21. Masalsky K.E., Godik V.M. Pyrolysis plants. M.: Khimiya. 1968. 143 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 08.02.2023

Принята к опубликованию 28.04.2023

Received 08.02.2023

Accepted 28.04.2023