ХИМИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ
CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF ORGANIC SUBSTANCES

ISSN 2410-6593 (Print), ISSN 2686-7575 (Online)

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-5-390-398>

УДК 665.6

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Гидродинамическая активация тяжелых нефтяных остатков

В.Б. Терентьева², Б.В. Пешнев¹, А.И. Николаев^{1,@}

¹МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова), Москва, 119571, Россия

²25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России, Москва, 121467 Россия

@Автор для переписки, e-mail: nikolaev_a@mirea.ru

Аннотация

Цели. В последние годы прослеживается тенденция увеличения в общем объеме добываемой нефти высоковязких, тяжелых нефтей, переработка которых требует новых технологических подходов. Эта задача тесно связана с необходимостью повышения глубины переработки нефти. Среди подходов, предлагаемых для решения отмеченных задач, встречается метод механохимической активации, который основан на использовании эффекта кавитации, создаваемого ультразвуковым или гидродинамическим способами. Цель работы заключалась в исследовании возможности использования эффекта кавитации для повышения глубины переработки нефти.

Методы. В качестве сырья использовались прямогонные и «вторичные» нефтепродукты: вакуумный газойль, газойль каталитического крекинга, мазуты. Активация проводилась в дезинтеграторе высокого давления, принцип действия которого заключался в сжатии нефтепродукта с последующим его пропуском через диффузор. При этом происходил резкий «сброс» давления до атмосферного, и в гидродинамическом потоке возникало явление кавитации. Градиент давлений на диффузоре варьировался от 20 до 50 МПа, а количество циклов обработки от 1 до 10. Определение плотности, коэффициента рефракции и фракционного состава нефтепродуктов осуществлялось с использованием стандартных и общепринятых методов.

Результаты. В работе представлены результаты влияния механохимической активации нефтепродуктов на изменение их физико-химических характеристик. Показано, что повышение градиента давлений и числа циклов обработки приводит к снижению температур начала кипения нефтепродуктов, их плотности и увеличению выхода фракций, выкипающих до 400 °С. Выход фракции с температурами кипения 400–480 °С и остатка при этом снижается. Отмечено снижение плотности и показателя преломления фракций с температурами кипения до 480 °С и повышение плотности остатка. Установлено, что эффект от явления кавитации (увеличение выхода фракций с температурами кипения до 400 °С, снижение плотности нефтепродукта) возрастал при увеличении градиента давлений и количества циклов обработки.

Выводы. Показано, что увеличение давления от 20 до 50 МПа и количества циклов гидродинамической кавитации способствует большему изменению плотности, температуры начала кипения и выхода фракций. Установлено, что повышение числа циклов обработки свыше 5 нецелесообразно. Отмечено, что с увеличением исходной плотности нефтепродукта эффективность воздействия возрастает. По плотностям и температурам кипения отдельных фракций нефтепродуктов оценена средняя молекулярная масса этих фракций. Расчет подтвердил предположение о протекании реакций крекинга нефтепродуктов под воздействием кавитации и свидетельствует о протекании процессов уплотнения.

Ключевые слова: кавитация, нефть, выход, светлые фракции, масляные фракции

Для цитирования: Терентьева В.Б., Пешнев Б.В., Николаев А.И. Гидродинамическая активация тяжелых нефтяных остатков. *Тонкие химические технологии*. 2021;16(5):390–398. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-5-390-398>

RESEARCH ARTICLE

Hydrodynamic activation of heavy oil residues

Vera B. Terenteva², Boris V. Peshnev¹, Alexander I. Nikolaev^{1,@}

¹MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, 119571 Russia

²The 25th State Research Institute of Himmotology, Ministry of Defence of Russian Federation, Moscow, 121467 Russia

@Corresponding author, e-mail: nikolaev_a@mirea.ru

Abstract

Objectives. Recently, there has been a tendency to increase the volume of high-viscosity heavy oils in the total volume of oil produced. The processing of these oils requires new technological approaches. This task is closely related to the need to increase the depth of oil refining. Among the approaches proposed to solve these problems, mechanochemical activation, which is based on the cavitation effect produced by ultrasonic or hydrodynamic methods, has been suggested. This study evaluated the effects of cavitation in increasing the depth of oil refining.

Methods. Straight-run and “secondary” oil products were used as raw materials: vacuum gas oil, catalytic cracking gas oil, and fuel oil. Activation was carried out in a high-pressure disintegrator. The principle of operation was to compress the oil product and then pass it through a diffuser. When the oil was passed through the diffuser, there was a sharp pressure release to atmospheric pressure, which caused cavitation in the hydrodynamic flow. The pressure gradient on the diffuser and the number of processing cycles ranged from 20 to 50 MPa and 1 to 10, respectively. The density, refractive index, and the fractional composition of petroleum products were determined using standard and generally accepted methods.

Results. This paper reports the influence of mechanochemical activation of petroleum products on their physical and chemical characteristics. An increase in the pressure gradient and the number of processing cycles leads to a decrease in the boiling point of the petroleum products and their density and an increase in the yield of fractions that boil off below 400 °C. The yield of the fractions with boiling points of 400–480 °C and the remainder were reduced. The density and refractive index of fractions with boiling points up to 480 °C decreased, and the density of the residue increased. The effects of cavitation (an increase in the yield of fractions with boiling points up to 400 °C and a decrease in the density of the petroleum products) increased with increasing pressure gradient and the number of processing cycles.

Conclusions. The changes in the density, boiling point, and the yield of fractions increased with increasing the pressure from 20 to 50 MPa and the number of hydrodynamic cavitation cycles from 1 to 5. Increasing the number of processing cycles to more than five had little additional effect. The effects of cavitation increased with increasing initial density of the oil product. The average molecular weight of these fractions was estimated from the densities and boiling points of individual fractions of the petroleum products. The calculation confirmed the assumption regarding the course of cracking reactions of petroleum products under the influence of cavitation and indicates the course of the compaction processes.

Keywords: cavitation, oil, yield, light fractions, oil fractions

For citation: Terenteva V.B., Peshnev B.V., Nikolaev A.I. Hydrodynamic activation of heavy oil residues. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2021;16(5):390–398 (Russ., Eng.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-5-390-398>

ВВЕДЕНИЕ

Эффективная переработка тяжелых нефтяных остатков становится одной из актуальных проблем нефтехимической промышленности. Это связано с необходимостью повышения глубины переработки нефти, а также с истощением запасов традиционных легких и средних нефтей, являвшихся сырьевым источником для производства моторных топлив, нефтехимической промышленности. Вместо них в топливно-энергетический баланс все больше вовлекаются тяжелые, высоковязкие нефти, для переработки которых требуются новые технологические подходы. Нужно отметить, что ресурсы тяжелых и битуминозных нефтей значительно превышают запасы легких нефтей и оцениваются в 750 млрд. т. Наиболее крупными запасами тяжелых нефтей располагают Канада (386 млрд. т) и Венесуэла (335 млрд. т). Запасы тяжелых нефтей России (месторождения Волго-Уральской, Тимано-Печорской, Западно-Сибирской нефтегазоносных провинций) оцениваются в 30–75 млрд. т. Тяжелые, высоковязкие нефти характеризуются высоким содержанием полиароматических углеводородов, асфальтено-смолистых веществ, и по этим показателям они близки к тяжелым нефтяным остаткам. Это позволяет предполагать и единство подходов к их переработке [1–3].

Наиболее распространенным способом переработки тяжелых нефтяных остатков является процесс коксования, на долю которого приходится до 40% остатков. Далее, по объемам переработки, располагаются процессы висбрекинга (~34%), гидроочистки (~18%), гидрокрекинга (~4%) и деасфальтизации (~3.5%) [4]. Эти же процессы рассматриваются и как способы переработки тяжелых нефтей, а их исследования проводятся во многих научных центрах [4–7].

Одновременно с традиционными методами переработки тяжелых нефтей и нефтепродуктов ведется активный поиск новых технологических подходов к их переработке [4, 8–10]. Среди новых, нетрадиционных методов воздействия на тяжелое нефтяное сырье часто рассматривается его механохимическая активация, предполагающая создание в нефтяном потоке кавитации физического процесса образования зародышей (пузырьков) в жидких средах с последующим их схлопыванием [11–15]. Исследователи отмечают, что в результате схлопывания пузырьков газа возможно локальное повышение температуры до 10000 К [16, 17]. В результате допускается протекание реакций крекинга, что отражается на фракционном составе нефти и нефтепродуктов. Вместе с тем, информация об изменении физико-химических характеристиках нефти противоречива. Одни исследователи указывают на снижение плотности и вязкости нефтепродуктов, в то время как по данным других исследователей в нефтепродуктах увеличивается содержание тяжелых фракций. Возможная причина отмеченных противоречий заключается в различиях характеристик исходного сырья, разных условиях его обработки [11–15].

В данной работе представлены результаты исследований авторов о влиянии условий механохимической активации нефтепродуктов на изменение их физико-химических характеристик.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве сырья использовались прямогонные и «вторичные» нефтепродукты: вакуумный газойль (ВГ), газойль каталитического крекинга (ГКК), мазут (М1 и М2) характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические характеристики образцов
Table 1. Physicochemical characteristics of the samples

Показатель Indicator	Образец / Sample			
	ГКК CCG	M1 M1	M2 M2	ВГ VG
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	1.1002	0.9684	0.9478	0.8998
Выход фракций, выкипающих в интервале температур, мас. % Yield of fractions boiling in the temperature range, wt %				
От $T_{\text{нк}}$ до 350 °С From the initial boiling point (T_{IBP}) to 350 °С	5.2	5.0	13.2	8.4
350–400 °С	25.8	9.0	15.8	34.5
400–480 °С	69.0	28.0	47.0	40.9
Выше 480 °С Above 480 °С		58.0	24.0	16.2

Примечание / Note: CCG – catalytic cracking gas oil, VG – vacuum gas oil.

Активация образцов нефтепродуктов проводилась в дезинтеграторе высокого давления, описанном в работе [18]. Принцип его действия заключается в том, что образец нефтепродукта сжимается до давления 20–50 МПа и пропускается через диффузор. При прохождении через диффузор происходит резкий «сброс» давления до атмосферного, и в гидродинамическом потоке возникает явление кавитации. Следует отметить, что прохождение образца через диффузор, минимальное количество которого составляет 0.5 л, из зоны высокого давления в зону атмосферного рассматривается как цикл. Количество циклов такого воздействия на сырье варьировалось от 1 до 10. Выбор температуры, при которой проводили активацию образцов, обусловлен тем, что согласно данным работ [19, 20] пузырьки газов, находящиеся в объеме жидкости, являются зародышами кавитации. Соответственно, чем больше зародышей в объеме нефтепродуктов, тем более интенсивно протекает кавитация. В связи с тем, что повышение температуры приводит к дегазации образцов, активацию проводили при минимальной температуре, обеспечивающей прокачиваемость нефтепродукта через аппарат. Так, для образца ВГ прокачиваемость достигалась при 30 °С, у образца ГКК – при 50 °С, а для образцов М1 и М2 только при 70 °С.

Плотность образцов определяли пикнометрическим методом, температуру начала кипения, выход фракций вакуумной дистилляции нефтепродуктов, показатель преломления – с использованием рефрактометрии.

Для образцов мазута и вакуумного газойля определяли выход фракций, выкипающих в следующих

диапазонах температур: $T_{\text{нк}}$ – 350, 350–400, 400–480 и выше 480 °С. Для газойля каталитического крекинга выход определяли для фракций, выкипающих до 350 °С и выше. Объединение фракций в одну (350 °С и выше) для газойля каталитического крекинга обусловлено тем, что повышение температуры выше 350 °С (в расчете на атмосферное давление) при проведении анализа приводило к протеканию реакций разложения углеводородов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для всех исследованных образцов после обработки отмечено снижение температур их начала кипения и плотности. Например, температура начала кипения образца М2 составляла 280 °С. После 5 циклов обработки при градиенте давлений 50 МПа она снизилась до 250 °С. Отмечено, что чем жестче были условия активации (выше градиент давлений, больше циклов воздействия), тем ниже была плотность полученного продукта (рис. 1). При этом после 5 циклов обработки характеристики образцов практически не изменялись.

Существенное изменение плотности обусловлено изменением выхода фракций (рис. 2). В результате активации увеличивался выход фракций, выкипающих до 400 °С и снижался выход тяжелой масляной фракции и остатка. Увеличение суммарного выхода легкой и средней масляных фракций зависело от градиента давления обработки. Так, суммарный выход этих фракций образца ВГ составлял ~43 мас. %. После 5 циклов обработки при давлении 20 МПа он был равен 46.5 мас. %, а после 5 циклов при давлении 50 МПа возрос до 52.6 мас. %.

Рис. 1. Влияние условий активации на плотность образца ГКК. Градиент давлений, МПа: 1 – 20; 2 – 30; 3 – 40; 4 – 50.

Fig. 1. Influence of the activation conditions on the CCG sample density. Pressure gradient, MPa: (1) 20; (2) 30; (3) 40; (4) 50.

Рис. 2. Влияние числа циклов активации на фракционный состав образца М2. Градиент давлений 50 МПа. Фракции: 1 – $T_{\text{нк}}$ –400 °С; 2 – 400–480 °С; 3 – остаток.

Fig. 2. Influence of the number of activation cycles on the M2 sample fractional composition. Pressure gradient 50 MPa. Fractions: (1) T_{IBP} –400 °C; (2) 400–480 °C; (3) residue.

В результате активации образцов изменился не только их фракционный состав, но и физико-химические характеристики отдельных фракций (плотность и показатель преломления). Для всех исследованных образцов было отмечено, что повышение градиента давлений и числа циклов обработки приводит к уменьшению показателя преломления и плотности фракций, выкипающих до 480 °С. Плотность фракции с температурой начала кипения выше 480 °С при этом увеличивалась (рис. 3, 4).

Следует отметить, что характер изменения плотности и показателя преломления фракций у всех рассматриваемых образцов нефтепродуктов был идентичен. Увеличивать количество циклов

Рис. 3. Влияние числа циклов активации на значения показателя преломления фракций образца М2.

Градиент давлений 40 МПа. Температуры кипения фракций, °С: 1 – $T_{\text{нк}}$ –350; 2 – 350–400; 3 – 400–480.

Fig. 3. Influence of the number of activation cycles on the refractive index of the M2 sample fractions.

Pressure gradient was 40 MPa. The boiling temperature of the fractions, °C: (1) T_{IBP} –350; (2) 350–400; (3) 400–480.

Рис. 4. Влияние градиента давлений на плотность фракций образца М1; 5 циклов активации.

Температуры выкипания фракций, °С: 1 – $T_{\text{нк}}$ –350; 2 – 350–400; 3 – 400–480; 4 – остаток.

Fig. 4. Influence of the pressure gradient on the M1 sample fractions density; five cycles of activation.

The boiling temperature of the fractions, °C: (1) T_{IBP} –350; (2) 350–400; (3) 400–480; (4) residue.

активации образцов более 5 не целесообразно, так как это не приводит к существенному изменению характеристик образцов.

Отмечена связь между плотностью исходного образца и изменениями, происходившими в результате его обработки – чем выше была плотность, тем более существенные изменения были отмечены. Например, выход фракций с температурой кипения до 400 °С у образца ВГ (исходная плотность 0.8998 г/см³) составлял 42.9 мас. %. После пятикратной обработки

при 50 МПа он возрос до 52.6 мас. %, то есть увеличился на 9.7 %. У образца М1 (плотность 0.9684 г/см³) выход этой фракции при тех же условиях обработки увеличился на 14.8%, а у образца ГKK (плотность 1.1002 г/см³) – на 24.5 мас. %.

Возможное повышение температуры в результате схлопывания пузырьков газа при кавитации объясняет зафиксированное авторами работы [21] образование непредельных углеводородов при обработке алканов, а также снижение температур начала кипения исследованных нами образцов и изменение физико-химических характеристик их отдельных фракций. Вполне допустимо предположить, что в результате локального повышения температуры, в результате реакций крекинга образуются алкены и углеводороды с меньшей молекулярной массой, характеризующиеся меньшими значениями плотности и показателя преломления.

В табл. 2 показано влияние условий активации на среднюю молекулярную массу фракции, выкипающей в интервале температур $T_{\text{нк}}-350$ °С для исследованных образцов.

Оценка средней молекулярной массы проводилась по формуле, рекомендуемой для узких нефтяных фракций [19]:

$$M = (160 - 5K) - 0.075T_{\text{ср.}} + 0.000156KT_{\text{ср.}}^2$$

где $T_{\text{ср.}}$ – средняя температура кипения фракции, а K – характеристический фактор, рассчитываемый на основании плотности и средней температуры кипения фракции [22].

Эта формула была выбрана в связи с тем, что разница между расчетными и экспериментальными

значениями (определенными криоскопическим методом на установке Крион-1, растворитель бензол) не превышала 10%. Например, для фракции с температурами кипения 400–480 °С образца М1 (5 циклов обработки при давлении 50 МПа) экспериментальное значение средней молекулярной массы составляло 350 единиц, а расчетное – 388.

Для всех исследованных образцов было отмечено снижение средней молекулярной массы фракции, выкипающей в интервале температур $T_{\text{нк}}-350$ °С, молекулярная масса фракций с температурами кипения 350–400 °С практически не изменялась, а фракций с большими температурами кипения – увеличивалась. Для фракций с температурами кипения выше 480 °С (остатка) это согласуется с увеличением их плотности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования механохимической обработки для повышения глубины переработки нефти (увеличения выхода светлых и масляных фракций); позволяют предположить возможность использования этого метода для переработки высоковязких, высокосмолистых нефтей; подтверждают данные научно-технической литературы о протекании реакций крекинга углеводородов под воздействием явления кавитации и показывают, что наряду с реакциями крекинга протекают и процессы уплотнения.

Вклад авторов

В.Б. Терентьева – проведение экспериментальных исследований, определение физико-химических характеристик объектов исследования и образовавшихся продуктов;

Таблица 2. Влияние условий активации на среднюю молекулярную массу фракции, выкипающей в интервале температур $T_{\text{нк}}-350$ °С

Table 2. Influence of the activation conditions on the average molecular weight of the fraction boiling in the $T_{\text{IBP}}-350$ °C temperature range

Условия механохимической активации Mechanochemical activation conditions		Средняя молекулярная масса образцов Average molecular weights of samples			
Число циклов обработки Number of processing cycles	Давление обработки, МПа Processing pressure, MPa	ВГ VG	М1 M1	М2 M2	ГKK CCG
Исходный образец Original sample		219	239	236	200
1	20	218	238	235	197
	50	213	230	229	192
5	20	215	232	230	194
	50	210	225	224	189

Б.В. Пешнев – постановка задач, планирование экспериментальных исследований, обработка полученных данных, подготовка полученных данных к публикации;

А.И. Николаев – постановка задач, планирование и проведение экспериментальных исследований, определение физико-химических характеристик объектов исследования и образовавшихся продуктов, обработка полученных данных, подготовка полученных данных к публикации.

Authors' contribution

V.B. Terenteva – conducting the experimental research, determining physicochemical parameters of objects studied and products obtained;

B.V. Peshnev – setting objectives, planning the experimental studies, processing the data obtained, preparation of the data obtained for publication;

A.I. Nikolaev – setting objectives, planning and conducting the experimental research, processing the data obtained, preparation of the data obtained for publication.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Халикова Д.А., Петров С.М., Башкирцева Н.Ю. Обзор перспективных технологий переработки тяжелых высоковязких нефтей и природных битумов. *Вестник Казанского технологического университета*. 2013;16(3):217–221.
2. Муслимов Р.Х., Романов Г.В., Каюкова Г.П. и др. Комплексное освоение тяжелых нефтей и природных битумов пермской системы Республики Татарстан. Казань: ФЭН; 2012. 396 с. ISBN 978-5-9690-0175-8
3. Муслимов Р.Х., Романов Г.В., Каюкова Г.П., Юсупова Т.Н., Петров С.М. Перспективы тяжелых нефтей. *Всероссийский экономический журнал ЭКО*. 2012;(1):35–40.
4. Галиуллин Э.А., Фахрутдинов Р.З. Новые технологии переработки тяжелых нефтей и природных битумов. *Вестник технологического университета*. 2016;19(4):47–51.
5. Шакирзянова Г.И., Сладовская О.Ю., Сладовский А.Г., Зимнякова А.С., Нигметзянов Н.С. Замедленное коксование как эффективная технология углубления переработки нефти. *Вестник технологического университета*. 2017;20(14):75–78.
6. Солодова Н.Л., Терентьева Н.А. Современное состояние и тенденции развития каталитического крекинга нефтяного сырья. *Вестник Казанского технологического университета*. 2012;15(1):141–147.
7. Хаджиев С.Н. Наногетерогенный катализ – новый сектор нанотехнологий в химии и нефтехимии (Обзор). *Нефтехимия*. 2011;51(1):3–16.
8. Галимов Р.А., Кротов В.В., Марданшин Р.Н., Харлампиди Х.Э., Кутуев А.А. Дифференциация нефти в магнитном поле. *Вестник технологического университета*. 2010;(3):467–471.
9. Мозговой И.В., Грязнов В.А., Миронова Е.В., Мозговой Е.И. Перспективы использования ультразвука в пиролизе. *Омский научный вестник*. 2010;3(93):300–303.
10. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов. *Вестник ТГТУ*. 2008;14(4):861–869.
11. Промтов М.А. Изменение фракционного состава нефти при гидроимпульсной кавитационной обработке. *Вестник ТГТУ*. 2017;23(3):412–419. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419>

REFERENCES

1. Halikova D.A., Petrov S.M., Bashkirtseva N.Y. Review of promising technologies of heavy high-viscosity oils and natural bitumen refinery. *Vestnik Kazanskogo Tehnologicheskogo Universiteta = Bulletin of the Kazan Technological University*. 2013;16(3):217–221 (in Russ.).
2. Muslimov R.H., Romanov G.V., Kayukova G.P., et al. *Kompleksnoe osvoenie tyazhelykh neftei i prirodnikh bitumov permskoi sistemy Respubliki Tatarstan (Integrated development of heavy oil and natural bitumen of the Perm system of the Tatarstan Republic)*. Kazan': FEN; 2012. 396 p. (in Russ.).
3. Muslimov R.Kh., Romanov G.V., Kayukova G.P., Yusupova T.N., Petrov S.M. Oil production prospects. *Vserossiiskii ekonomicheskii zhurnal EKO = ECO Journal*. 2012;(1):35–40 (in Russ.).
4. Galiullin E.A., Fakhruddinov R.Z. New technologies for processing heavy oils and natural bitumen. *Vestnik technologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*. 2016;19(4):47–51 (in Russ.).
5. Shakirzyanova G.I., Sladovskaya O.Yu., Sladovskii A.G., Zimnyakova A.S., Nigmatzyanov N.S. Delayed coking as effective technology of oil refinery deepening. *Vestnik technologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*. 2017;20(14):75–78 (in Russ.).
6. Solodova N.L., Terenteva N.A. Current state and development trends of catalytic petroleum cracking. *Vestnik Kazanskogo Tehnologicheskogo Universiteta = Bulletin of the Kazan Technological University*. 2012;15(1):141–147 (in Russ.).
7. Hadzhiev N.S. Nanoheterogeneous catalysis—a new sector of nanotechnology in chemistry and petrochemistry (Review). *Neftekhimiya = Petroleum Chemistry*. 2011;51(1):3–16 (in Russ.).
8. Galimov R.A., Krotov V.V., Mardanshin R.N., Harlampidi H.E., Kutuev A.A. Oil differentiation in a magnetic field. *Vestnik technologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*. 2010;(3):467–471 (in Russ.).
9. Mozgovoy I.V., Gryaznov V.A., Mironova E.V., Mozgovoy E.I. Perspective of ultrasound application at pyrolysis. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2010;3(93):300–303 (in Russ.).

12. Бесов А.С., Колтунов К.Ю., Брулев С.О., Кириленко В.Н., Кузьменков С.И., Пальчиков Е.И. Деструкция углеводородов в кавитационной области в присутствии электрического поля при активации водными растворами электролитов. *Письма в ЖТФ*. 2003;29(5):71–77.
13. Кравченко О.В. Физико-химические преобразования углеводородных соединений с использованием новых кавитационных устройств. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007;1(37):65–69.
14. Бахтин Б.И., Десятов А.В., Корба О.И., Кубышкин А.П., Скороходов А.С. Низкотемпературный крекинг углеводородов в кавитационных ультразвуковых полях. Мир нефтепродуктов. *Вестник нефтяных компаний*. 2009;(6):14–19.
15. Иванов С.В., Антонюк Н.С., Луцковская В.А., Кравченко В.В., Воробьев С.И., Торховский В.Н. О возможности увеличения глубины отбора вакуумных дистиллатов при перегонке нефти за счет предварительной механоактивации. *Вестник МИТХТ (Тонкие химические технологии)*. 2012;7(2):48–50.
16. Bhangu S.K., Ashokkumar M. Theory of sonochemistry. *Top. Curr. Chem. (Z)*. 2016;374(4):56. <https://doi.org/10.1007/s41061-016-0054-y>
17. Avvaru B., Venkateswaran N., Uppara P., Iyengar S.B., Katti S.S. Current knowledge and potential applications of cavitation technologies for the petroleum industry. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;42:493–507. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.12.010>
18. Воробьев С.И., Торховский В.Н., Титорский И.А., Казмалы И.К. Механодеструкция углеводородов нефти с помощью дезинтегратора высокого давления. *Вестник МИТХТ (Тонкие химические технологии)*. 2008;3(3):78–85.
19. Сиротюк М.Г. *Акустическая кавитация*. М.: Наука; 2008. 271 с. ISBN 978-5-02-036656-5
20. Смородов Е.А., Галиахметов Р.Н., Ильгамов М.А. *Физика и химия кавитации: монография*. М.: Наука; 2008. 225 с. ISBN 978-5-02-036626-8
21. Рудин М.Г., Сомов В.Е., Фомин А.С. *Карманный справочник нефтепереработчика*. М.: ЦНИИТЭнефтехим; 2004. 336 с.
22. Глаголева О.Ф., Капустин В.М. *Технология переработки нефти*. В 2-х частях. Часть первая. М.: Химия. КолосС; 2007. 400 с.
10. Promptov M.A. Prospects of the cavitation technologies application for intensification of chemical technological processes. *Vestnik TGTU = Transactions of the TSTU*. 2008;14(4):861–869 (in Russ.).
11. Promptov M.A. Change in fractional composition of oil in hydro-pulse cavitation processing. *Vestnik TGTU = Transactions of the TSTU*. 2017;23(3):412–419 (in Russ.). <https://doi.org/10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419>
12. Besov A.S., Koltunov K.U., Brulev S.O., Kirilenko V.N., Kuzmenkov S.I., Palchikov E.I. Destruction of hydrocarbons in the cavitation area in the electric field upon activation with aqueous solutions of electrolytes. *Pis'ma v ZhTF = Technical Physics Letters*. 2003;29(5):71–77 (in Russ.).
13. Kravchenko O.V. Hydrocarbon compounds physicochemical transformations using new cavitation devices. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya = Aerospace Engineering and Technology*. 2007;1(37):65–69 (in Russ.).
14. Bakhtin B.I., Desyatov A.V., Korba O.I., Kubyshekin A.P., Skorokhodov A.S. Low-temperature cracking of hydrocarbons in cavitation ultrasonic fields. *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii = World of Petroleum Products*. 2009;(6):14–19 (in Russ.).
15. Ivanov S.V., Antonyuk P.S., Lutskovskaya V.A., Kravchenko V.V., Vorobyov S.I., Torkhovskiy V.N. About the possibility of increasing the amount of vacuum gasoil from oil distillation by preliminary mechanical activation of oil. *Tonkie khimicheskie tekhnologii = Fine Chemical Technologies*. 2012;7(2):48–50 (in Russ.).
16. Bhangu S.K., Ashokkumar M. Theory of sonochemistry. *Top. Curr. Chem. (Z)*. 2016;374(4):56. <https://doi.org/10.1007/s41061-016-0054-y>
17. Avvaru B., Venkateswaran N., Uppara P., Iyengar S.B., Katti S.S. Current knowledge and potential applications of cavitation technologies for the petroleum industry. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;42:493–507. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.12.010>
18. Vorobyev S.I., Torhovskiy V.N., Tutorskiy I.A., Kazmaly I.K. Mechanodestruction of raw oil hydrocarbons by high-pressure disintegrator. *Tonkie khimicheskie tekhnologii = Fine Chemical Technologies*. 2008;3(3):78–85 (in Russ.).
19. Sirotiyuk M.G. *Akusticheskaya kavitatsiya (Acoustic cavitation)*. Moscow: Nauka; 2008. 271 p. (in Russ.). ISBN 978-5-02-036656-5
20. Smorodov E.A., Galiakhmetov R.N., Il'gamov M.A. *Fizika i khimiya kavitatsii: monografiya (Physics and chemistry of cavitation: monograph)*. Moscow: Nauka; 2008. 225 p. (in Russ.). ISBN 978-5-02-036626-8
21. Rudin M.G., Somov V.E., Fomin A.S. *Karmannyi spravochnik neftepererabotchika (Oil refinery pocket guide)*. Moscow: TsNIITEnftekhim; 2004. 336 p. (in Russ.).
22. Glagoleva O.F., Kapustin V.M. *Tekhnologiya pererabotki nefii (Oil refining technology)*. In 2 v. V. 1. Moscow: Khimiya. KolosS; 2007. 400 p. (in Russ.).

Об авторах:

Терентьева Вера Борисовна, инженер, 25 Государственный научно-исследовательский институт химмотологии Минобороны России (121467, Россия, Москва, ул. Молодогвардейская, д. 10). E-mail: terenteva-vb@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4624-1507>

Пешнев Борис Владимирович, д.т.н., профессор кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: peshnev@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0507-2754>

Николаев Александр Игоревич, д.т.н., профессор кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). E-mail: nikolaev_a@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-8594-2985>

About the authors:

Vera B. Terenteva, Engineer, The 25th State Research Institute of Himmotology, Ministry of Defence of the Russian Federation (10, Molodogvardeyskaya ul., Moscow, 121467, Russia). E-mail: terenteva-vb@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4624-1507>

Boris V. Peshnev, Dr. Sci. (Tech.), Professor, A.N. Bashkirov Department of Petrochemical Synthesis and Artificial Liquid Fuel Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). E-mail: peshnevbv@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0507-2754>

Alexander I. Nikolaev, Dr. Sci. (Tech.), Professor, A.N. Bashkirov Department of Petrochemical Synthesis and Artificial Liquid Fuel Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia). E-mail: nikolaev_a@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0001-8594-2985>

*Поступила: 23.10.2020; получена после доработки 11.12.2020; принята к опубликованию: 04.10.2021.
The article was submitted: October 23, 2020; approved after reviewing: December 11, 2021; accepted for publication: October 04, 2021.*