

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ КАВИТАЦИИ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ НЕФТИ****Б.В. Пешнев, А.И. Николаев, Д.В. Никишин, М.Х.И. Алхамеди**

Борис Владимирович Пешнев (ORCID 0000-0002-0507-2754), Александр Игоревич Николаев (ORCID 0000-0001-8594-2985), Денис Васильевич Никишин (ORCID 0000-0002-4466-4402)\*, Муатаз Хади Исмаил Алхамеди

Кафедра технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, МИРЭА – Российский технологический университет, пр-т Вернадского, 86, Москва, Российская Федерация, 119571  
E-mail: peshnev@mirea.ru, nikolaev\_a@mirea.ru, nikishin@mirea.ru\*

*На протяжении последних десятилетий в балансе добываемых углеводородов прослеживается тенденция возрастания доли тяжелых, высоковязких нефтей. Их транспортировка и переработка сопряжена с повышенными энергозатратами, снизить которые возможно, используя инновационный метод обработки нефти, основанный на явлении кавитации. Нужно отметить, что информация об изменении характеристик нефти в результате кавитационной обработки противоречива. Это касается и характера изменения показателей и стабильности этих изменений во времени. В ряде случаев различный характер изменений связывают с групповым составом образцов. Данная работа посвящена исследованию влияния кавитационной обработки нефтей различной природы на их фракционный состав и характеристики отдельных фракций. Здесь же предпринята попытка определения оптимального времени фракционирования нефти (после обработки) с позиций наибольшего выхода светлых фракций. В качестве объектов исследования в работе были выбраны тяжелая и легкая нефти Ильского месторождения (Краснодарский край). Изучение влияния условий обработки на вязкость нефтепродуктов проводилось на образце прямогонного мазута (МП), полученного на установке ЭЛОУ-АВТ-6 и предоставленного АО «Газпромнефть – МНПЗ». Кавитационную обработку образцов проводили в аппарате ГВД «Донор-2». Плотность образцов и их фракций определяли в соответствии с ГОСТ 3900-85 «Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности». Фракционный состав нефтей в соответствии с ГОСТ 2177-99 «Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава». Для определения фракционного состава темных нефтепродуктов использовали перегонку под вакуумом. Кинематическую вязкость определяли по ГОСТ 33-2016. Проведенные исследования показали перспективность использования явления кавитации в процессах переработки нефти. Используя это явление, возможно изменить (снизить) вязкость нефтепродукта, увеличить выход фракций с меньшими температурами кипения. При этом эффективность воздействия возрастает с увеличением плотности нефтепродукта. Полученные результаты не подтверждают информацию о пост-эффекте кавитационной обработки нефтепродуктов, когда изменения характеристик образца продолжают еще в течение некоторого времени. На примере измерения вязкости образца мазута показано, что после обработки начинается релаксация характеристик, причем наиболее заметно она протекает в первые 5 дней после обработки. Это позволяет рекомендовать проводить обработку образца непосредственно перед его фракционированием. Также следует отметить, что в результате кавитационной обработки изменению подвергаются не только темные, но и светлые погоны нефти, при этом во всех погонах наряду с процессами деструкции и изомеризации, протекают и процессы уплотнения.*

**Ключевые слова:** кавитация, физико-химические свойства нефти и нефтепродуктов

**Для цитирования:**

Пешнев Б.В., Николаев А.И., Никишин Д.В., Алхамеди М.Х.И. Перспективы использования явления кавитации при переработке нефти. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 4. С. 110–116. DOI: 10.6060/ivkkt.20236604.6760.

**For citation:**

Peshnev B.V., Nikolaev A.I., Nikishin D.V., Alkhamedi M.Kh.I. Prospects of using the cavitation phenomenon in oil refining. *ChemChemTech* [Изв. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. V. 66. N 4. P. 110–116. DOI: 10.6060/ivkkt.20236604.6760.

**PROSPECTS OF USING THE CAVITATION PHENOMENON IN OIL REFINING**

**B.V. Peshnev, A.I. Nikolaev, D.V. Nikishin, M.Kh.I. Alkhamedi**

Boris V. Peshnev (ORCID 0000-0002-0507-2754), Alexander I. Nikolaev (ORCID 0000-0001-8594-2985), Denis V. Nikishin (ORCID 0000-0002-4466-4402)\*, Muataz Khadi Ismail Alkhamedi

A.N. Bashkirov Department of Petrochemical Synthesis and Artificial Liquid Fuel Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University, Vernadskogo ave., 86, Moscow, 119571, Russia

E-mail: peshnev@mirea.ru, nikolaev\_a@mirea.ru, nikishin@mirea.ru\*

*Over the past decades, the balance of hydrocarbon production shows a rising trend of production heavy, high-viscosity oil. Their transportation and refining involves higher energy costs, which can be reduced by using the innovative oil treatment method based on the creation of the cavitation phenomenon. It should be noted that the information about the change in oil characteristics as a result of cavitation treatment is contradictory. This also applies to the nature of the change in the properties and the stability of these changes over time. In some cases, the different nature of the changes is associated with the group composition of the samples. This paper is devoted to the study of the influence of cavitation oil treatment of different nature on their fractional composition and characteristics of individual fractions. Here was an attempt to determine the optimal time of fractionation of oil (after processing) in order to obtain the greatest output of light fractions. Heavy and light oil from the IIsk field (Krasnodar Krai) were selected as the research subjects. The study of the influence of the treatment conditions on the viscosity of oil products was carried out on the sample of straight-run fuel oil (SRFO) provided by AO «Gazpromneft - MNPZ», obtained at the ELOU-AVT-6 unit. Cavitation processing of samples was carried out in the apparatus of HPH «Donor-2». The density of the samples and their fractions were determined according to GOST 3900-85 «Oil and petroleum products. Methods for the determination of the density». Fractional composition of petroleum in accordance with GOST 2177-99 «Petroleum products. Methods of determination of fractional composition». Vacuum distillation was used to determine the fractional composition of dark petroleum products. Kinematic viscosity was determined by GOST 33-2016. The conducted researches have shown the prospect of using the cavitation phenomenon in oil refining processes. It is possible to change (reduce) the viscosity of the oil product, to increase the yield of fractions with lower boiling points by using this phenomenon. The efficiency of the treatment increases with the increase in the density of the oil product. The results do not confirm information about the post-effect of cavitation treatment of petroleum products, when changes in the characteristics of the sample continue for some time after refining. By measuring the viscosity of the fuel oil sample, it is shown that the relaxation of the characteristics begins after treatment and it is most noticeable during the first 5 days after treatment. This allows us to recommend to treatment the sample immediately prior to fractionation. It should also be noted that as a result of cavitation treatment, not only dark but also light petroleum fractions are affected, and in all of these fractions along destruction and isomerization reactions, there are also processes of compaction.*

**Key words:** cavitation, physical and chemical properties of oil and petroleum products

**ВЕДЕНИЕ**

В последние годы прослеживается тенденция возрастания в объеме добываемой нефти доли тяжелых, высоковязких нефтей [1, 2]. Транспортировка и переработка таких нефтей предполагает

возрастание энергозатрат. Для снижения вязкости нефти при ее транспортировке используют термический нагрев, эмульгаторы. Одновременно с этим рассматривают и инновационные методы, предполагающие воздействие на нефть электромагнитным излучением, ультразвуковыми колебаниями

или создание в нефтяном потоке кавитационных явлений [3]. В результате воздействия физических полей изменяется толщина сольватного слоя сложных структурных единиц нефтяных дисперсных систем, ассоциаты разрушаются, вязкость нефти снижается.

Отмечается также [2, 4-8], что в результате обработки нефти не только снижается вязкость нефтепродукта, но и его плотность, температура начала кипения, возрастает выход легких фракций.

Нужно отметить, что информация о влиянии обработки на характеристики нефтей различной природы достаточно противоречива. Так одни авторы [9], указывают что особенно заметно вязкость снижается у высокопарафинистых нефтей, в то время как по мнению других [10] эффективность обработки возрастает при снижении содержания парафинов. Противоречива информация и об изменении характеристик обработанных образцов во времени. В одних работах указывается на релаксацию показателей [11], в то время как авторы других фиксировали усиление изменений, а релаксация начиналась только спустя некоторое время [12].

Изменение фракционного состава нефтей в результате волновой обработки позволяет допустить и изменение характеристик их отдельных фракций. Это тем более справедливо, что во многих работах отмечалось изменение углеводородного состава образцов после их волновой обработки [13-15].

Данная работа посвящена исследованию влияния кавитационной обработки нефтей различной природы на их фракционный состав и характеристики отдельных фракций. Здесь же предпринята попытка определения оптимального времени фракционирования нефти (после обработки) с позиций наибольшего выхода светлых фракций.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объектов исследования в этой работе были выбраны тяжелая (НТ) и легкая (НЛ) нефти Ильского месторождения (Краснодарский край). Некоторые их характеристики представлены в табл. 1.

Изучение влияния условий обработки на вязкость нефтепродуктов проводилось на образце прямогонного мазута (МП), полученного на установке ЭЛОУ-АВТ-6 и предоставленного АО «Газпромнефть – МНПЗ». Его характеристики представлены в табл. 2.

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

Таблица 1

#### Физико-химические характеристики образцов нефти Ильского месторождения

Table 1. Physical and chemical characteristics of oil samples of Iisk field

Показатель	Образец	
	НТ	НЛ
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	969,3	881,0
Температура начала кипения, °С	160	56
Выход фракций, % об.:		
Т <sub>нк</sub> -160 °С	0,0	11,9
160-230 °С	0,5	19,2
230-350 °С	5,2	19,5
выше 350 °С	94,3	49,4

Таблица 2

#### Физико-химические характеристики мазута

Table 2. Physical and chemical characteristics of fuel oil

Показатель	Значения
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	954,2
Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	397,4
Температура начала кипения, °С	257
Выход фракций, % об.	
Т <sub>нк</sub> -350 °С	6,9
350-400 °С	14,0
400-480 °С	27,2
выше 480 °С	51,9

Кавитационную обработку образцов проводили в аппарате ГВД «Донор-2»\*, описание которого приведено в работе [7]. В данном аппарате явление кавитации реализуется в гидродинамическом режиме, механизм которого заключается в следующем. При прохождении жидкости через сужение или при обтекании твердого тела в потоке возникает локальное снижение давления (вследствие возрастания скорости потока). Это давление может оказаться ниже давления насыщенных паров этой жидкости, в результате чего в объеме возникают пузырьки паров и растворенных газов. За сужением или препятствием скорость потока снижается, давление потока возрастает, и под действием возросшего давления образовавшиеся пузырьки схлопываются. В локальной точке их схлопывания температура может повыситься до 10000 К, что и приводит к изменениям характеристик нефтепродукта [16, 17].

В этих исследованиях при обработке образцов давление варьировали от 20 до 50 МПа, а количество циклов воздействия изменяли от 1 до 10. Обработку образцов НТ и МП проводили при 50 °С

(для снижения их вязкости и снижения давления при прокачке), образец НЛ обрабатывали при 20 °С.

Плотность образцов и их фракций определяли пикнометрическим методом в соответствии с ГОСТ 3900-85 «Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности».

Фракционный состав светлых нефтепродуктов определяли на аппарате АРНП-1 в соответствии с ГОСТ 2177-99 «Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава».

Для определения выхода фракций темных нефтепродуктов использовали перегонку под вакуумом по методике, описанной в [18].

Показатель преломления определяли на рефрактометре ИРФ-454 Б2М в соответствии с методическими рекомендациями, приведенными в ГОСТ 18995.2-73 «Продукты химические жидкие. Метод определения показателя преломления».

Кинематическую вязкость определяли капиллярными вискозиметрами типов ВНЖ и ВПЖ при 50 °С по ГОСТ 33-2016. Вязкость обработанных образцов определялась в день обработки, на 5 и на 20 дни после обработки.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выше отмечалось, что физико-химические характеристики образцов изменяются не только в результате обработки, но и после нее. В этой связи представлялось целесообразным определить условия (время после обработки), обеспечивающие максимальный выход светлых (легких) продуктов. В качестве фактора, по которому контролировали содержание легких фракций в нефтепродукте, была выбрана его вязкость. Такой подход позволял также выявить время, в течение которого сохраняются наиболее благоприятные условия (с точки зрения минимальной вязкости) для транспортировки нефтепродукта.

Влияние условий кавитационной обработки на вязкость образца МП, а также изменение

его кинематической вязкости во времени после обработки, показано на рис. 1.

Можно отметить, что вязкость образца МП после обработки существенно снижалась, причем изменения были тем существеннее, чем выше было давление и количество циклов обработки. Однако, в течение 5 дней эффект от обработки снижался в 1,3-1,4 раза. Релаксация вязкостных характеристик продолжалась и далее, но с меньшей скоростью. В этой связи определение физико-химических характеристик образца и его фракционирование проводили в день обработки.

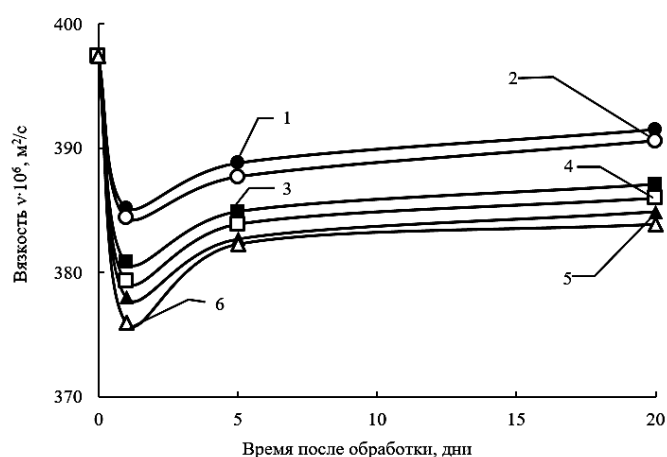


Рис. 1. Влияние условий обработки и времени, прошедшего после обработки, на кинематическую вязкость образца МП: 1 – давление обработки 30 МПа, единичное воздействие; 2 – давление обработки 50 МПа, единичное воздействие; 3 – давление обработки 30 МПа, 3 цикла воздействия; 4 – давление обработки 50 МПа, 3 цикла воздействия; 5 – давление обработки 30 МПа, 5 циклов воздействия; 6 – давление обработки 50 МПа, 5 циклов воздействия

Fig. 1. Influence of the processing conditions and post-treatment time on kinematic viscosity of SRFO sample: 1 – processing pressure 30 MPa, single processing cycle; 2 – processing pressure 50 MPa, single processing cycle; 3 – processing pressure 30 MPa, 3 processing cycles; 4 – processing pressure 50 MPa, 3 processing cycles; 5 – processing pressure 30 MPa, 5 processing cycles; 6 – processing pressure 50 MPa, 5 processing cycles

Таблица 3

Влияние условий обработки образца МП на его физико-химические характеристики  
Table 3. Influence of the processing conditions of the SRFO sample on its physical-chemical characteristics

Условия обработки		Плотность образца, кг/м <sup>3</sup>	Температура начала кипения, °С	Выход фракций Т <sub>нк</sub> -400 °С, % об.	Плотность фракции Т <sub>нк</sub> -350 °С, кг/м <sup>3</sup>	Показатель преломления фракции 400-480 °С
Давление, МПа	Число циклов					
Исходный образец		954,2	257	20,9	868,2	1,5232
20	1	954,0	255	21,7	866,7	1,5222
20	3	953,0	250	22,3	864,7	1,5216
40	1	953,0	252	22,5	865,1	1,5210
40	3	951,5	240	23,4	862,4	1,5200

Влияние условий обработки на физико-химические характеристики образца МП аналогично закономерностям, установленным в работе [19]: после кавитационной обработки образца снижалась его плотность, температура начала кипения, увеличивался выход фракций, выкипающих  $T_{нк}$ -400 °С, снижались плотность и коэффициент рефракции фракций, выкипающих до 480 °С. При этом, чем выше было давление обработки или количество циклов, тем существеннее были изменения (табл. 3).

Результаты, полученные в процессе обработки образцов НТ и НЛ (давление 50 МПа, 5 циклов), аналогичны представленным в табл. 3 – плотность образцов понизилась (до 934,7 кг/м<sup>3</sup> у образца НТ и 871,9 кг/м<sup>3</sup> у образца НЛ), увеличился выход светлых фракций и снизился выход темных. При этом больший эффект был отмечен для образца НТ. Суммарный выход фракций, выкипающих  $T_{нк}$ -350 °С, для этого образца возрос с 5,7 до 28,0 % об., а выход фракций  $T_{нк}$ -160 °С составил 5,0%, температура начала кипения понизилась со 160 до 106 °С. Для образца НЛ эти изменения были значительно меньше. Суммарный выход фракций  $T_{нк}$ -350 °С увеличился только на 3,2% (с 50,6 до 53,8 % об.). Однако и в этом случае было отмечено снижение температуры начала кипения (с 56 до 39 °С) и увеличение выхода фракции, выкипающей до 160 °С (с 11,9 до 12,5 % об.).

Стоит отметить, что в результате обработки изменился не только выход бензиновой фракции, но и температуры ее выкипания (рис. 2).

В результате кавитационной обработки образца НЛ температуры выкипания ~60% объема бензиновой фракции понизились, но у оставшихся

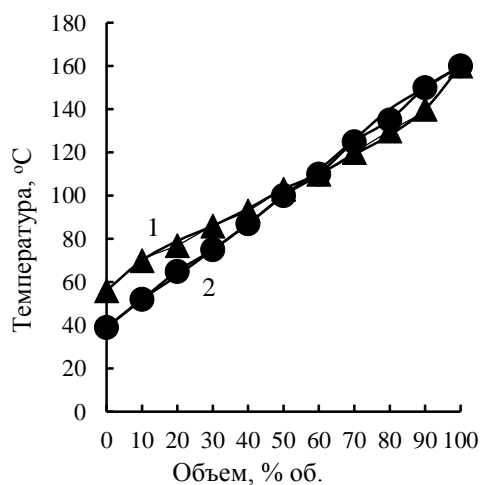


Рис. 2. «Кривая» выкипания бензиновой фракции образца НЛ до (1) и после (2) обработки

Fig. 2. «Curve» the distillation of gasoline fraction of NL sample before (1) and after (2) treatment

40% оказались выше, чем до обработки. Такие изменения могут быть объяснены реакциями крекинга, изомеризации, протекающими в результате локального повышения температуры при схлопывании пузырьков газа. Предположение о возможном протекании реакций крекинга и изомеризации при кавитационной обработке углеводородов высказывается во многих публикациях [4, 6, 14, 16], а в нашем случае это подтверждается снижением температур начала кипения образцов. Протекание реакций крекинга, позволяет предположить и наличие реакций, приводящих к образованию более тяжелых продуктов. Для темных нефтепродуктов это подтверждают увеличением плотности фракций, выкипающих выше 480 °С [19]. Данные, приведенные на рис. 2 (пересечение «кривых разгонки»), свидетельствуют о том, что протекание процессов уплотнения возможно не только в тяжелых, но и в светлых фракциях.

Уже указывалось, что в результате обработки образцов НТ и НЛ снизился выход фракций, выкипающих выше 350 °С. Выход этой фракции из образца НТ понизился с 94,3 до 72,2 % об., а у образца НЛ – с 49,4 до 46,2 % об. Но большего внимания заслуживают изменения физико-химических характеристик фракций в результате обработки (табл. 4).

Таблица 4

**Влияние обработки (50 МПа, 5 циклов) на физико-химические характеристики фракции, выкипающей выше 350 °С**

**Table 4. Influence of treatment (50 MPa, 5 cycles) on the physicochemical characteristics of the fraction boiling above 350 °С**

Показатель	До обработки		После обработки	
	Образец		Образец	
	НТ	НЛ	НТ <sub>а</sub>	НЛ <sub>а</sub>
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	973,6	940,2	980,6	949,9
Выход фракций, % об.				
350-400 °С	25,1	30,1	27,1	32,5
400-500 °С	30,9	27,0	26,7	22,6
выше 500 °С	44,0	42,9	46,2	44,9

Здесь важно следующее. В предыдущих наших исследованиях [19-21] изучалось влияние гидродинамической кавитации на характеристики темных нефтепродуктов (мазатов, гудронов, вакуумных газойлей). Во всех случаях после обработки фиксировалось снижение плотности образцов, увеличение выхода фракций, выкипающих до 480 °С. Аналогичные результаты получены и в этой работе на образце МП. Влияние условий обработки на

плотность образца МП показано в табл. 3, а выход фракций с температурой кипения выше 480 °С, после 5 циклов обработки при давлении 50 МПа, понизился с 51,9 до 49,2%. В случае же кавитационной обработки нефтей отмечено повышение плотности фракций с температурой кипения выше 350 °С (которые ранее рассматривались как исходное сырье), а при их перегонке под вакуумом зафиксировано и увеличение выхода остатка.

### ВЫВОДЫ

Обобщая представленные материалы, можно отметить перспективность использования явления кавитации в процессах переработки нефти. Используя это явление, возможно изменить (снизить) вязкость нефтепродукта, увеличить выход фракций с меньшими температурами кипения. При этом эффективность воздействия возрастает с увеличением плотности нефтепродукта. Полученные результаты не подтверждают информацию о пост-эффекте кавитационной обработки нефтепродуктов,

когда изменения характеристик образца продолжают еще в течение некоторого времени. На примере измерения вязкости образца МП показано, что после обработки начинается релаксация характеристик, причем наиболее заметно она протекает в первые 5 дней после обработки. Это позволяет рекомендовать проводить обработку образца непосредственно перед его фракционированием. Полученные результаты свидетельствуют о том, что изменениям при кавитационной обработке подвергаются не только темные, но и светлые погоны нефти, при этом во всех погонах наряду с реакциями деструкции и изомеризации протекают и процессы уплотнения.

*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. Галимов Р.А., Кротов В.В., Марданшин Р.Н., Харлампиди Х.Э. Дифференциация нефти в магнитном поле. *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2010. № 3. С. 467-471.
2. Промтов М.А. Гидроимпульсная кавитационная обработка нефти в роторном импульсном аппарате. *Вестн. ТГТУ*. 2018. Т. 24. № 3. С. 455-460. DOI: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.455-460.
3. Грумондз В.Т., Мягков К.Г., Степанова В.В. Применение пузырьковой кавитации к обработке углеводородных жидкостей. *Вестн. Моск. авиац. ин-та*. 2007. Т. 14. № 3. С. 146-152.
4. Промтов М.А. Изменение фракционного состава нефти при гидроимпульсной кавитационной обработке. *Вестн. ТГТУ*. 2017. Т. 23. № 3. С. 412-419. DOI: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419.
5. Прачкин В.Г., Галаяутдинов А.Г., Баранов Д.А. Изменение коллоидно-дисперсных свойств нефтяных систем с использованием ультразвукового воздействия. *Нефтепромысл. дело*. 2015. № 6. С. 58-63.
6. Хамидуллин Р.Ф., Харлампиди Х.Э., Никулин Р.М., Ситало А.В., Шараф Ф.А. Увеличение выхода светлых дистиллятов при помощи активации нефтяного сырья. *ХТТМ*. 2016. № 6 (598). С. 29-34.
7. Воробьев С.И., Торховский В.Н., Тугорский И.А., Казмалы И.К. Механодеструкция углеводородов нефти с помощью дезинтегратора высокого давления. *Вестн. МИТХТ*. 2008. Т. 3. № 3. С. 77-84.
8. Червяков В.М., Юдаев В.Ф., Воробьев Ю.В., Алексеев В.А., Чичева-Филатова Л.В., Акулов Н.И. Режимы работы технологического оборудования с возбуждением кавитации. *Вестн. ТГТУ*. 2005. Т. 11. № 2. С. 399-403.
9. Багаутдинов Р.И., Танатаров Р.А., Карамышев В.Г. Исследование влияния волновых процессов на реологические свойства нефти. *Тр. Науч.-исслед. ин-та по выш. нефтеотдачи пластов*. 2000. Вып. 2. С. 190-195.

### REFERENCES

1. Galimov R.A., Krotov V.V., Mardanshin R.N., Harlampidi H.E. Differentiation of oil in a magnetic field. *Vest. Kazan. Tekhnol. Univ.* 2010. N 3. P. 467-471 (in Russian).
2. Promtov M.A. Hydro-pulse cavitation treatment of crude oil in the rotor-stator device. *Vest. TSTU*. 2018. V. 24. N 3. P. 455-460 (in Russian). DOI: 10.17277/vestnik.2018.03.pp.455-460.
3. Grumondz V.T., Myagkov K.G., Stepanova V.V. Application of bubble cavitation to the treatment of hydrocarbon liquids. *Vest. Moscow. Aviat. Inst.* 2007. V. 14. N 3. P. 146-152 (in Russian).
4. Promtov M.A. Change in fractional composition of oil in hydro-pulse cavitation processing. *Vest. TSTU*. 2017. V. 23. N 3. P. 412-419 (in Russian). DOI: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419.
5. Prachkin V.G., Galyautdinov A.G., Baranov D.A. Changing of colloid-dispersed properties of oil systems using ultrasonic treatment. *Neftepromysl. Delo*. 2015. N 6. P. 58-63 (in Russian).
6. Khamidullin R.F., Kharlampidi H.E., Nikulin R.M., Sitalo A.V., Sharaf F.A. Increasing the yield of light distillates by activating petroleum raw materials. *Khim. Tekhol. Topliv Masel*. 2016. N 6 (598). P. 29-34 (in Russian).
7. Vorob'ev S.I., Torhovskij V.N., Tutorskij I.A., Kazmaly I.K. Mechanodestruction of petroleum hydrocarbons using a high-pressure disintegrator. *Vest. MITHT*. 2008. V. 3. N 3. P. 77-84 (in Russian).
8. Chervyakov V.M., Yudaev V.F., Vorob'ev Yu.V., Alekseev V.A., Chicheva-Filatova L.V., Akulov N.I. Modes of operation of technological equipment with cavitation excitation. *Vest. TSTU*. 2005. V. 11. N 2. P. 399-403 (in Russian).
9. Bagautdinov R.I., Tanatarov R.A., Karamyshev V.G. Investigation of the influence of wave processes on the rheological properties of oil. *Tr. Nauch.-Issled. Un-ta Povyssheniyu Nefteotdachi Plastov*. 2000. V. 2. P. 190-195 (in Russian).

10. Волкова Г.И., Прозорова И.В., Ануфриев Р.В., Юдина Н.В., Муллакаев М.С., Абрамов В.О. Ультразвуковая обработка нефтей для улучшения вязкостно-температурных характеристик. *Нефтепереработка и нефтехимия*. 2012. № 2. С. 3-6.
11. Торховский В.Н., Чижевская Е.В., Антонюк С.Н., Николаев С.А., Воробьев С.И. Об использовании имитированной дистилляции при изучении влияния гидродинамической кавитации на превращения углеводородного сырья. *Сб. тр. Нетрадиц. природ. ресурсы, инновац. технологии и продукты*. 2016. Т. 23. С. 86-97.
12. Винокуров В.А., Фролов В.И., Крестовников М.П., Лесин С.В., Шишкин Ю.Л. Исследование влияния волнового воздействия на нефти. *Нефтепереработка и нефтехимия*. 2012. № 8. С. 3-8.
13. Торховский В.Н., Воробьев С.И., Егорова Е.В., Иванов С.В., Городский С.Н. Превращение алканов под действием единичного импульса гидродинамической кавитации. I. Поведение алканов C13-C15. *Вестн. МИТХТ*. 2013. Т. 8. № 6. С. 27-32.
14. Торховский В.Н., Чижевская Е.В., Антонюк С.Н., Николаев С.А., Воробьев С.И. Об использовании имитированной дистилляции при изучении влияния гидродинамической кавитации на превращения углеводородного сырья. Сообщение 2. *Сб. тр. Нетрадиц. природ. ресурсы, инновац. технологии и продукты*. 2016. Т. 24. С. 69-74.
15. Дудкин Д.В., Федяева И.М., Журавлёва Л.А. Химические превращения циклоалканов при гидродинамическом кавитационном воздействии водных сред. *Сб. тр. Междунар. науч. форума «Наука и инновации – современные концепции»*. Москва. 2020. С. 167-177.
16. Анисимов А.С., Карасёв Ю.В., Ивашкин А.А. Способы улучшения эксплуатационных свойств дизельного топлива. *Молодой учёный*. 2016. № 26 (130). С. 1-3.
17. Кашкина Л.В., Стеблева О.П., Петраковская Э.А., Бажуков О.А. Влияние гидродинамической кавитации на структуру и свойства сажевых частиц. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2013. Т. 56. Вып. 5. С. 40-44.
18. Рыбак В.М. Анализ нефти и нефтепродуктов. М.: ГНТИНГТЛ. 1962. 888 с.
19. Терентьева В.Б., Пешнев Б.В., Николаев А.И. Гидродинамическая активация тяжёлых нефтяных остатков. *Тонкие хим. техн.* 2021. Т. 16. № 5. С. 390-398. DOI: 10.32362/2410-6593-2021-5-390-398.
20. Терентьева В.Б., Николаев А.И., Пешнев Б.В. Повышение выхода дистиллятных фракций при коксовании нефтяных остатков. *Тонкие хим. техн.* 2019. Т. 14. № 1. С. 75-81. DOI: 10.32362/2410-6593-2019-14-1-75-81.
21. Николаев А.И., Пешнев Б.В., Алхамеди М.Х.И. Кавитационная обработка обводнённых нефтепродуктов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 7. С. 94-99. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6611.
10. Volkova G.I., Prozorova I.V., Anufriev R.V., Yudina N.V., Mullakaev M.S., Abramov V.O. Ultrasonic oil treatment to improve viscosity-temperature characteristics. *Neftepererabotka Neftekhim*. 2012. N 2. P. 3-6 (in Russian).
11. Torhovskij V.N., Chizhevskaya E.V., Antonyuk S.N., Nikolaev S.A., Vorob'ev S.I. On the use of limited distillate in the study of the effect of hydrodynamic cavitation on the transformation of hydrocarbon raw materials. *Sb. tr. Netradits. prirod. resursy, innovats. tekhnologii i produkty*. 2016. V. 23. P. 86-97 (in Russian).
12. Vinokurov V.A., Frolov V.I., Krestovnikov M.P., Lesin S.V., Shishkin Yu.L. Investigation of the effect of wave action on oil. *Neftepererabotka Neftekhim*. 2012. N 8. P. 3-8 (in Russian).
13. Torhovskiy V.N., Vorobyev S.I., Egorova E.V., Ivanov S.V., Gorodskiy S.N. Conversion of alkanes under single pulse of hydrodynamic cavitation. I. Behavior of C13–C15 alkane. *Vest. MITKHT*. 2013. V. 8. N 6. P. 27-32 (in Russian).
14. Torhovskiy V.N., Chizhevskaya E.V., Antonyuk S.N., Nikolaev S.A., Vorobyev S.I. On the use of limited distillation in the study of the effect of hydrodynamic receipts on the transformation of hydrocarbon raw materials. Message 2. *Sb. tr. Netradits. prirod. resursy, innovats. tekhnologii i produkty*. 2016. V. 24. P. 69-74 (in Russian).
15. Dudkin D.V., Fedyaeva I.M., Zhuravleva L.A. Chemical transformations of cycloalkanes under hydrodynamic cavitation action of water-based Cycloalkanes under hydrodynamic cavitation action of water-based. *Sb. tr. Mezhdunar. nauch. foruma «Nauka i innovacii – sovremennye koncepcii»*. Moscow. 2020. P. 167-177 (in Russian).
16. Anisimov A.S., Karasyov Yu.V., Ivashkin A.A. Ways to improve the operational properties of diesel fuel. *Molodoy Uchyonny*. 2016. N 26 (130). P. 1-3 (in Russian).
17. Kashkina L.V., Stebleva O.P., Petrakovskaya E.A., Bayukov O.A. The effect of hydrodynamic cavitation on the structure and properties of soot particles. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2013. V. 56. N 5. P. 40-44 (in Russian).
18. Rybak V.M. Analysis nefti i nefteproduktov. M.: GNTINGTL. M.: 1962. 888 p.
19. Terenteva V.B., Peshnev B.V., Nikolaev A.I. Hydrodynamic activation of heavy oil residues. *Tonkie Khim. Tekhnol.* 2021. V. 16. N 5. P. 390-398 (in Russian). DOI: 10.32362/2410-6593-2021-5-390-398.
20. Terenteva V.B., Nikolaev A.I., Peshnev B.V. Increasing yield of distillate fractions during coking of petroleum residues. *Tonkie Khim. Tekhnol.* 2019. P. 14. N 1. P. 75-81 (in Russian). DOI: 10.32362/2410-6593-2019-14-1-75-81.
21. Nikolaev A.I., Peshnev B.V., Alhamedi M.H.I. Cavitation treatment of watered oil products. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 7. P. 94-99 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6611.

Поступила в редакцию 11.11.2022  
Принята к опубликованию 16.01.2023

Received 11.11.2022  
Accepted 16.01.2023