

КАВИТАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ОБВОДНЕННЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ

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

Александр Игоревич Николаев (ORCID 0000-0001-8594-2985)*, Борис Владимирович Пешнев (ORCID 0000-0002-0507-2754) Алхамеди Муатаз Хади Исмаил

Кафедра технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова, МИРЭА – Российский технологический университет, пр-т Вернадского, 86, Москва, Российская Федерация, 119571

E-mail: nikolaev_a@mirea.ru*

В работе представлены результаты исследования влияния наличия воды в нефти и нефтепродуктах на изменение их физико-химических характеристик при кавитационной обработке. В качестве объектов исследования использовались образцы мазута (М) и гидроочищенного вакуумного газойля (ГВГ), а также модельное сырье, полученное добавлением к исходным образцам от 1%об. до 20%об. воды. Активация образцов проводилась в дезинтеграторе высокого давления марки Донор-2, принцип действия которого заключался в сжатии нефтепродукта и последующего его пропускания через диффузор. При прохождении через диффузор, вследствие резкого «сброса» давления до атмосферного, в гидродинамическом потоке возникает явление кавитации. Активацию проводили при значениях градиента давлений на диффузоре 20 МПа и 50 МПа, в режимах однократной обработки и обработки с 5-кратной цикличностью. Определение плотности и выхода фракций осуществлялось с использованием стандартных и общепринятых методов. В результате проведенных исследований влияния кавитационной обработки обводненных нефтепродуктов на изменение их физико-химических характеристик показано, что повышение градиента давлений и числа циклов обработки приводит к снижению плотности, температуры начала кипения нефтепродуктов и увеличению выхода фракций, выкипающих до 400 °С. Выход фракции с температурами кипения 400-480 °С и остатка при этом снижается. Установлено, что присутствие в нефтепродукте воды приводит к большему изменению физико-химических характеристик по сравнению с обезвоженными образцами. Увеличение содержания воды в образцах усиливает эффект от кавитационного воздействия. Эффективность воздействия возрастает и при увеличении дисперсности капель воды в водонефтяной эмульсии.

Ключевые слова: кавитация, кавитационная обработка нефти, физико-химические свойства нефти и нефтепродуктов, повышение степени переработки нефти

CAVITATION TREATMENT OF WATERED OIL PRODUCTS

A.I. Nikolaev, B.V. Peshnev, M.H.I. Alhamedi

Alexander I. Nikolaev (ORCID 0000-0001-8594-2985)*, Boris V. Peshnev (ORCID 0000-0002-0507-2754), Alhamedi Muataz Hadi Ismail

Department of Technology of Petrochemical Synthesis and Artificial Liquid Fuel named after A.N. Bashkirov, MIREA-Russian Technological University, Vernadsky ave., 86, Moscow, 119571, Russia

E-mail: nikolaev_a@mirea.ru*

The paper presents the results of the study of the influence of the presence of water in oil and petroleum products on the change in their physico-chemical characteristics during cavitation treatment. As objects of research, samples of fuel oil (M) and hydrotreated vacuum gas oil (ГВГ) were used, as well as model raw materials obtained by adding 1% vol. to 20%vol. of water to the initial samples. The activation of the samples was carried out in a high-pressure disintegrator of the brand Donor-2, the principle of operation of which it consisted in compressing the oil product and then passing it through the diffuser. When passing through the diffuser, due to a sharp "reset"

of pressure to atmospheric, the phenomenon of cavitation occurs in the hydrodynamic flow. The pressure gradient on the diffuser was 20 MPa and 50 MPa, and the number of treatment cycles was 1 and 5. Determination of the density and yield of fractions was carried out using standard and generally accepted methods. As a result of the conducted studies of the effect of cavitation treatment of watered petroleum products on changes in their physico-chemical characteristics it is shown that an increase in the pressure gradient and the number of treatment cycles leads to a decrease in the density, the boiling point of petroleum products and an increase in the yield of fractions boiling up to 400 °C. The yield of the fraction with boiling points of 400-480 °C and the residue is reduced at the same time. It was found that the presence of water in the oil product leads to a greater change in the physicochemical characteristics compared to dehydrated samples. An increase in the water content in the samples enhances the effect of cavitation. The effectiveness of the effect also increases with an increase in the dispersion of water droplets in the water-oil emulsion.

Key words: cavitation, oil cavitation treatment, oil and petroleum physico-chemical properties, products, increasing the degree of oil refining

Для цитирования:

Николаев А.И., Пешнев Б.В., Алхамеди М.Х.И. Кавитационная обработка обводненных нефтепродуктов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 7. С. 94–99. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6611.

For citation:

Nikolaev A.I., Peshnev B.V., Alhamed 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. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6611.

Вопросы интенсификации химических, тепло- и массообменных процессов, протекающих в жидкой фазе, вследствие явления кавитации регулярно затрагиваются в литературе [1-10]. Например, в пищевой промышленности, при производстве биологически активных соединений и лекарственных форм суспензионного и эмульсионного типов кавитационная обработка способствует повышению дисперсности получаемых эмульсий и уничтожению в них вредных микроорганизмов.

Применение кавитационной обработки в энергетике связывают с получением топлив в виде водо-угольных суспензий и угольно-масляных паст, а также с использованием водо-мазутных эмульсий [3]. Предполагается, что сжигание такого топлива позволит снизить выбросы оксидов углерода и азота, утилизировать угольный шлак и нефтяные отходы, снизить себестоимость получения тепловой энергии [11].

Вместе с тем в литературе практически отсутствует информация о влиянии воды на изменение характеристик нефтяного сырья в результате его кавитационной обработки. Между тем, по данным ряда исследователей [12-15], кавитационная обработка нефти изменяет ее фракционный состав, повышая выход светлых фракций. В связи с тем, что образование зародышей кавитационных пузырьков связывают с наличием в жидкой среде границы раздела фаз [7, 16], можно ожидать, что в присутствии воды эффект от кавитационной обработки нефти увеличится.

В работе представлены результаты исследований влияния условий кавитационной обработки на изменение физико-химических характеристик обводненных нефтепродуктов.

Объектами исследования были выбраны образцы мазута (М) и гидроочищенного вакуумного газойля (ГВГ), характеристики которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические характеристики исходных образцов

Table 1. Physical and chemical characteristics of the initial samples

Показатель	Образец	
	М	ГВГ
Плотность, г/см ³	0,9684	0,8989
Температура начала кипения T _{нк} , °C	290	256
Выход фракций, % масс.		
T _{нк} -350 °C	5	5,6
350 - 400 °C	9	35,5
400 - 480 °C	28	49,4
480 °C и выше	58	9,0

Также использовались модельные смеси, полученные добавлением к исходному образцу от 1% об. до 20% об. воды. Для обозначения таких смесей к букве исходного необводненного образца добавляли цифру, характеризующую содержание воды в образце. Например, обозначение М1 значит, что к исходному образцу мазута было добавлено 1% об. воды.

Дисперсность капель воды определяли с использованием микроскопа Digital Microscope 1600х.

Кавитационная обработка образцов проводилась на лабораторной установке с использованием аппарата марки Донор-2, обеспечивающего возникновение кавитации в гидродинамическом потоке [17]. Установка содержит расходную, промежуточную, приемную емкости и аппарат Донор-2. Образец нефтепродукта из расходной емкости подавался в аппарат Донор-2, в котором при градиентах давления 20 и 50 МПа подвергался обработке. Далее нефтепродукт направлялся в промежуточную или приемную емкость. Выбор емкости обусловлен количеством циклов обработки образца. Так, при однократной обработке образец направлялся в приемную емкость, а при многократной в промежуточную и далее возвращается в исходную.

Плотности образцов устанавливали пикнометрическим методом в соответствии с методикой,

представленной в ГОСТ 3900-85 «Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности».

Выход фракций определяли на лабораторной установке вакуумной дистилляции нефтепродуктов с использованием колбы Кляйзена. Следует отметить, что при дистилляции обводнённых образцов, до их кавитационной обработки, происходил «переброс» нефтепродукта из колбы Кляйзена в приемную. После кавитационной обработки таких образцов, а также у образцов, не содержащих воды, этого эффекта не наблюдалось. В модельных образцах после кавитации вода невооруженным глазом не идентифицировалась, а при дистилляции отгонялась вместе с фракцией $T_{нк} - 350\text{ }^\circ\text{C}$, а в последующем легко отделялась от углеводородов отстаиванием.

Влияние условий кавитационной обработки на физико-химические характеристики образцов показано в табл. 2.

Таблица 2

Физико-химические характеристики обработанных образцов М и М1
Table 2. Physico-chemical characteristics of activated samples M and M1

Условия обработки			Характеристика образцов				
Давление, МПа	Количество циклов	Образец	Плотность, г/см ³	Выход фракций, % масс.			
				$T_{нк} - 350\text{ }^\circ\text{C}$	350-400 °С	400-480 °С	480 °С и выше
20	1	М	0,9653	7,1	10,2	26,0	56,7
		М1	0,9602	7,5	11,5	28,0	53,0
	5	М	0,9578	10,6	12,7	22,6	54,1
		М1	0,9502	11,3	14,1	27,0	47,6
50	1	М	0,9549	10,0	14,0	22,8	54,9
		М1	0,9471	10,4	15,1	22,1	52,4
	5	М	0,9473	13,7	14,5	23,6	48,2
		М1	0,9345	15,8	16,7	22,5	45,0

Характер влияния давления и количества циклов обработки на физико-химические характеристики образцов аналогичен представленному в работах [18-20]. Повышение градиента давлений в диффузоре, как и увеличение числа циклов обработки сопровождалось большим снижением плотности образца, повышением выхода фракций с температурами кипения до 400 °С и снижением выхода фракций с большими температурами кипения. Более того, результаты подтверждают предположение о том, что в присутствии воды эффект от кавитационного воздействия может увеличиться. Так, при градиенте давления 50 МПа и 5 циклов обработки плотность активированного образца М составляла 0,9473 г/см³, а обработанного образца М1 0,9345 г/см³, а выход фракции $T_{нк} - 350\text{ }^\circ\text{C}$ увеличился на 20%.

Предположение об усилении эффекта кавитационной обработки нефтепродуктов в присутствии воды базировалось на том, что зародыши кавитационных пузырьков формируются на границе раздела фаз, в том числе и на границе фаз капель воды и нефти в водо-нефтяной эмульсии. В таком случае эффективность обработки должна зависеть от содержания воды в эмульсии. При увеличении содержания воды в эмульсии увеличивается поверхность раздела фаз и можно ожидать большего эффекта от обработки.

В табл. 3 показано влияние содержания воды в нефтепродукте на физико-химические характеристики образцов. Кавитационная обработка образцов осуществлялась при градиенте давления 50 МПа и 5 циклах обработки.

Таблица 3

Влияние содержания воды в эмульсии на физико-химические характеристики образцов
 Table 3. The effect of the water content in the emulsion on the physico-chemical characteristics of the samples

Образец	Содержание воды, % об.	Плотность, г/см ³	Выход фракций, % масс.			
			Тнк-350 °С	350-400 °С	400-480 °С	480 °С и выше
M1	1	0,9345	15,8	16,7	22,5	45,0
M3	3	0,9135	18,5	17,8	21,3	42,4
M5	5	0,9035	22,0	19,0	19,6	39,4
M20	20	0,9015	22,3	19,3	19,9	38,5

Действительно, увеличение содержания воды в образцах усиливает эффект от воздействия. При большем содержании воды образце после кавитационной обработки фиксируется большее снижение его плотности и увеличение выхода фракций, выкипающих до 400 °С. Наибольший выход этих фракций фиксировался при содержании воды в образце 20% об. Однако наиболее существенные изменения фиксировались при увеличении содержания воды до 5% об.

Поверхность раздела фаз возрастает также

и при увеличении дисперсности (уменьшении диаметра) капель воды. В табл. 4 показано влияние размеров внутренней фазы (капель воды) на эффективность обработки гидроочищенного вакуумного газойля с содержанием воды 10% об. Обработка образцов осуществлялась при градиенте давления 50 МПа и 5 циклах воздействия.

Образцы различались средним размером частиц дисперсионной фазы. Для одного образца она составляла 0,7 мм, для другого 0,3 мм, и соответственно образцы обозначались как ГВГ10-0,7 (рис. а) и ГВГ10-0,3 (рис. б).

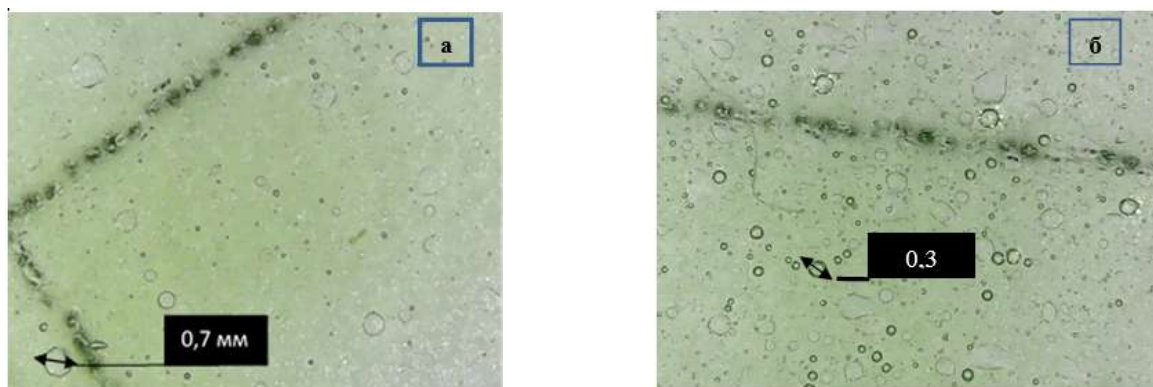


Рис. Микрофотографии водонефтяной системы а) - ГВГ10-0,7 и б) - ГВГ10-0,3
 Fig. Micrographs of the water and oil system of ГВГ10-0,7 of ГВГ10-0,3

Таблица 4
 Физико-химические характеристики обработанных образцов ГВГ10-0,7 и ГВГ10-0,3
 Table 4. Physico-chemical characteristics of activated samples of ГВГ10-0,7 and ГВГ10-0,3

Показатель	Образец	
	ГВГ 10-0,7	ГВГ 10-0,3
Плотность, г/см ³	0,9039	0,8993
Выход фракций, % масс.		
Тнк-350 °С	7	8
350-400 °С	37	39
400-480 °С	48	46
480 °С и выше	8	7

Можно отметить, что увеличение дисперсности капель водной фазы в ~2,3 раза привело к

возрастанию границ раздела фаз в ~5,4 раза и повысило выход фракций, выкипающих до 400 °С.

Представленные результаты подтверждают предположение о зарождении ядер кавитации на границе раздела фаз. Для нефтяных систем такими границами могут являться не только границы диспергированных нефтяных частиц (асфальтенов) с нативной средой, но и границы диспергированной водной фазы и углеводородной среды. Результаты также показывают, что кавитационная обработка обводненных углеводородов приводит к большему выходу фракций, выкипающих до 400 °С. При этом, при последующей вакуумной разгонке таких обводнённых нефтепродуктов вода уходит с «легкими» фракциями и в последующем легко отделяется отстаиванием.

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

REFERENCES

1. **Кардашев Г.А.** Физические методы интенсификации процессов химической технологии. М.: Химия. 1990. 208 с.
2. **Промтов М.А.** Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества. М.: Машиностр. 2004. 136 с.
3. **Федоткин И.М., Гулый И.С.** Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Киев: ОКО. 2000. 898 с.
4. **Немчин А.Ф.** Новые технологические эффекты тепло-массопереноса при использовании кавитации. *Пром. теплотехн.* 1997. Т. 19. Вып. 6. С. 39–47.
5. **Богданов В.В., Христофоров Б.И., Клоцунг Б.А.** Эффективные малообъемные смесители. Л.: Химия. 1989. 224 с.
6. **Слизнева Т.Е., Акулова М.В., Разговоров П.Б.** Влияние механомагнитной активации растворов CaCl_2 и $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ на фазовый состав цементного камня. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 12. С. 101-107. DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.6114.
7. **Витенько Т.Н., Гумницкий Я.М.** Механизм активирующего действия гидродинамической кавитации на воду. *Химия и технология воды.* 2007. Т. 29. Вып. 5. С. 422–432.
8. **Промтов М.А.** Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. М.: Машиностр. 2001. 260 с. DOI: 10.3103/S1063455X07050037.
9. **Балабышко А.М., Зимин А.И., Ружицкий В.П.** Гидромеханическое диспергирование. М.: Наука. 1998. 330 с.
10. **Хмелев В.Н.** Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. 2007. 400 с.
11. **Винтовкин А.А.** Технологическое сжигание и использование топлива. М.: Теплотехник. 2005. 288 с.
12. **Промтов М.А.** Кавитационная технология улучшения качества углеводородных топлив. *Хим. и нефтегаз. машиностр.* 2008. Вып. 2. С. 6–8. DOI: 10.1007/s10556-008-9014-x.
13. **Промтов М.А., Авсеев А.С.** Импульсные технологии переработки нефти и нефтепродуктов. *Нефтеперераб. и нефтехимия.* 2007. Вып. 6. С. 22–24.
14. **Золотухин В.А.** Новая технология для переработки тяжелой нефти и осадков нефтеперерабатывающих производств. *Хим. и нефтегаз. машиностр.* 2004. Вып. 10. С. 8–11. DOI: 10.1007/s10556-005-0014-9.
15. **Нестеренко А.И., Берлизов Ю.С.** Возможность крекинга углеводородов под действием кавитации. Количественная энергетическая оценка. *Химия и технол. топлив и масел.* 2007. Вып. 6. С. 43–44. DOI: 10.1007/s10553-007-0089-4.
16. **Ершов М.А., Муллакаев М.А., Баранов Д.А.** Снижение вязкости парафинистых нефтей обработкой в гидродинамическом проточном реакторе. Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. М.: ВНИИОЭНГ. 2011. Вып. 4. С. 22-26.
1. **Kardashev G.A.** Physical methods of intensification of chemical technology processes. M.: Khimiya. 1990. 208 p. (in Russian).
2. **Promptov M.A.** Machines and devices with impulse energy effects on the processed substances. M.: Mashinostr. 2004. 136 p. (in Russian).
3. **Fedotkin I.M., Guly I.S.** Cavitation, cavitation technique and technology, their use in industry. Kiev: OKO. 2000. 898 p. (in Russian).
4. **Nemchin A.F.** New technological effects of heat and mass transfer when using cavitation. *Prom. Teplotekhn.* 1997. V. 19. N 6. P. 39–47 (in Russian).
5. **Bogdanov V.V., Khristoforov B.I., Klotsung B.A.** Efficient low volume mixers. L.: Khimiya. 1989. 224 p. (in Russian).
6. **Slizneva T.E., Akulova M.V., Razgovorov P.B.** Influence of mechanomagnetic activation of CaCl_2 and $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ solutions on the phase composition of cement stone. *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]* 2019. V. 62. N 12. P. 101-107 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20196212.6114.
7. **Vitenko T.N., Gumnitskiy Ya.M.** The mechanism of the activating action of hydrodynamic cavitation on water. *Khim. Tekhnol. Vody.* 2007. V. 29. N 5. P. 422–432 (in Russian).
8. **Promptov M.A.** Rotary pulsating apparatus: theory and practice. M.: Mashinostr. 2001. 260 p. (in Russian). DOI: 10.3103/S1063455X07050037.
9. **Balabyshko A.M., Zimin A.I., Ruzhitskiy V.P.** Hydromechanical dispersion. M.: Nauka. 1998. 330 p. (in Russian).
10. **Khmelev V.N.** Ultrasonic multifunctional and specialized devices for the intensification of technological processes in industry, agriculture and households. Biysk: Izd. Alt. gos. tekhn. un-ta. 2007. 400 p. (in Russian).
11. **Vintovkin, A.A.** Technological combustion and fuel use. M.: Teplotekhnika. 2005. 288 p. (in Russian).
12. **Promptov M.A.** Cavitation technology for improving the quality of hydrocarbon fuels. *Khim. Neftegaz. Mashinostr.* 2008. N 2. P. 6–8 (in Russian). DOI: 10.1007/s10556-008-9014-x.
13. **Promptov M.A., Avseev A.S.** Impulse technologies for processing oil and oil products. *Neftepererab. Neftekhim.* 2007. N 6. P. 22–24 (in Russian).
14. **Zolotukhin V.A.** New technology for the processing of heavy oil and oil refinery sludge. *Khim. Neftegaz. Mashinostr.* 2004. N 10. P. 8–11 (in Russian). DOI: 10.1007/s10556-005-0014-9.
15. **Nesterenko A.I., Berliozov Yu.S.** Possibility of cracking of hydrocarbons under the influence of cavitation. Quantitative energy assessment. *Khim. Tekhnol. Topliv Masel.* 2007. N 6. P. 43–44 (in Russian). DOI: 10.1007/s10553-007-0089-4.
16. **Ershev M.A., Mullakaev M.A., Baranov D.A.** Reducing the viscosity of paraffinic oils by treatment in a hydrodynamic flow reactor. Equipment and technologies for the oil and gas complex. M.: VNIIOENG. 2011. N 4. P. 22-26 (in Russian).

17. Торховский В.Н., Воробьев С.И., Антонюк С.Н., Егорова Е.В., Иванов С.В., Кравченко В.В., Городский С.Н. Использование многоциклового кавитации для интенсификации переработки нефтяного сырья. *Технологии нефти и газа*. 2015. Вып. 2. С. 10-17.
18. Терентьева В.Б., Николаев А.И., Торховский В.Н., Пешнев Б.В., Воробьев С.И. Гидродинамическая кавитация нефтяного сырья. Тез. докл. Всеросс. науч. конф. «Переработка углеводородного сырья. Комплексные решения» (Левинтерские чтения). Самара: Самар. гос. техн. ун-т. 2016. С. 263-264.
19. Терентьева В.Б., Николаев А.И., Торховский В.Н., Пешнев Б.В., Воробьев С.И., Конькова Н.А., Арнацкий Г.А. Механохимическая активация нефти и тяжелых нефтяных остатков. Тез. докл. III Всеросс. молод. науч. конф. с междунар. уч. «Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы». Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН. 2017. С. 231-233.
20. Терентьева В.Б., Пешнев Б.В., Николаев А.И. Гидродинамическая активация тяжелых нефтяных остатков. *Тонкие хим. технологии*. 2021. Вып. 5. С. 390–398.
17. Torkhovskiy V.N., Vorobiev S.I., Antonyuk S.N., Egorova E.V., Ivanov S.V., Kravchenko V.V., Gorodskiy S.N. The use of high-cycle cavitation to intensify the processing of petroleum feedstocks. *Tekhnol. Nefti Gaza*. 2015. N 2. P. 10-17 (in Russian).
18. Terentyeva V.B., Nikolaev A.I., Torkhovskiy V.N., Peshnev B.V., Vorobiev S.I. Hydrodynamic cavitation of crude oil. Abstracts. report All-Russian Scientific Conference "Processing of Hydrocarbon Raw Materials. Complex solutions" (Levinter readings). Samara: Samar. gos. tekhn. un-t. 2016. P. 263-264 (in Russian).
19. Terentyeva V.B., Nikolaev A.I., Torkhovskiy V.N., Peshnev B.V., Vorobiev S.I., Kon'kova N.A., Arnatsky G.A. Mechanochemical activation of oil and heavy oil residues. Abstracts. report III All-Russian youth scientific conference with international participation "Environmentally friendly and resource-saving technologies and materials". Ulan-Ude: Izd. BNTs SO RAN. 2017. P. 231-233 (in Russian).
20. Terentyeva V.B., Peshnev B.V., Nikolaev A.I. Hydrodynamic activation of heavy oil residues. *Tonkie Khim. Tekhnol.* 2021. N 5. P. 390-398 (in Russian). DOI: 10.32362/2410-6593-2021-16-5-390-39.

Поступила в редакцию 04.03.2022
Принята к опубликованию 29.03.2022

Received 04.03.2022
Accepted 29.03.2022