

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ТЕМНЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА СОДЕРЖАНИЕ В НИХ СЕРЫ

Б.В. Пешнев, Д.В. Никишин, А.И. Николаев, А.Н. Королев

Борис Владимирович Пешнев (ORCID 0000-0002-0507-2754), Денис Васильевич Никишин (ORCID 0000-0002-4466-4402)*, Александр Игоревич Николаев (ORCID 0000-0001-8594-2985), Александр Николаевич Королев (ORCID 0000-0003-2709-3342)

Кафедра химии и технологии основного органического синтеза, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), пр. Вернадского, 78, Москва, Российская Федерация, 119454

E-mail: peshnev@mirea.ru, nikishin@mirea.ru*, nikolaev_a@mirea.ru, waterpolist2000@yandex.ru

В работе рассмотрено влияние условий проведения кавитационной обработки темных нефтепродуктов (мазута, гидроочищенного вакуумного газойля и газойля каталитического крекинга) на содержание в них серы. Обработку нефтепродуктов проводили в гидродинамическом режиме, используя для этого аппарат ДА-1. В ряде случаев, для усиления эффекта обработки, сырье предварительно насыщали воздухом, пропан-бутановой фракцией или компаундировали с декалином. Отмечено, что кавитационная обработка образца приводила к снижению содержания в нем серы. Установлена связь между условиями обработки (давлением, создаваемым в аппарате, количеством циклов воздействия, компаундирования образца с газами или декалином) и снижением содержания серы – оно было тем больше, чем «жестче» было воздействие. Изменение содержания серы было неравномерным в различных фракциях. Во всех случаях оно снижалось во фракциях с температурой кипения выше 480 °С. При этом, в ряде случаев (в зависимости от условий воздействия), во фракциях с меньшими температурами кипения отмечалось увеличение содержания серы. Такой характер изменения содержания серы в образце, особенно в высококипящих фракциях, позволяет предположить локализацию пузырьков кавитации на поверхности сложных структурных единиц нефтяной дисперсной системы, сформированных смолами и асфальтенами (характеризующихся наибольшим содержанием гетероатомных структур), их деструкцию и миграцию образовавшихся серосодержащих компонентов во фракции с меньшими температурами кипения. Установлено, что при использовании пропан-бутановой фракции (по сравнению с воздухом) достигается большая эффективность обработки, что, вероятно, связано с большей растворимостью газообразных углеводородов в нефтепродуктах.

Ключевые слова: нефть и нефтепродукты, гидродинамическая кавитация, интенсификация, содержание серы, серосодержащие соединения, обессеривание, десульфуризация, физико-химические свойства

INFLUENCE OF CAVITATION TREATMENT CONDITIONS OF DARK PETROLEUM PRODUCTS ON THE SULFUR CONTENT IN THEM

B.V. Peshnev, D.V. Nikishin, A.I. Nikolaev, A.N. Korolev

Boris V. Peshnev (ORCID 0000-0002-0507-2754), Denis V. Nikishin (ORCID 0000-0002-4466-4402)*, Alexander I. Nikolaev (ORCID 0000-0001-8594-2985), Alexander N. Korolev (ORCID 0000-0003-2709-3342)

Department of Chemistry and Technology of Basic Organic Synthesis, Institute of Fine Chemical Technologies named after M.V. Lomonosov, MIREA - Russian Technological University (RTU MIREA), Vernadskogo ave., 78, Moscow, 119454, Russia

E-mail: peshnev@mirea.ru, nikishin@mirea.ru*, nikolaev_a@mirea.ru, waterpolist2000@yandex.ru

The effect of cavitation treatment conditions of dark oil products (fuel oil, hydrotreated vacuum gas oil and catalytic cracking gas oil) on their sulfur content is considered. The treatment of petroleum products was carried out in a hydrodynamic mode, using the DA-1 apparatus for this. In some cases, to enhance the processing effect, the raw material was pre-saturated with air, propane-butane fraction or compounded with decal. It was noted that cavitation treatment of the sample led to a decrease in the sulfur content in it. A relationship was established between the treatment conditions (pressure created in the device, the number of exposure cycles, compounding the sample with gases or decal) and the reduction in sulfur content - it was greater the "severe" the exposure. The change in the sulfur content was uneven in different fractions. In all cases, it decreased in fractions with a boiling point above 480 °C. At the same time, in a number of cases (depending on the conditions of exposure), an increase in the sulfur content was observed in fractions with lower boiling points. Such a nature of changes in the sulfur content in the sample, especially in high-boiling fractions, allows us to assume the localization of cavitation bubbles on the surface of complex structural units of the oil dispersed system formed by resins and asphaltenes (characterized by the highest content of heteroatomic structures), their destruction and migration of the formed sulfur-containing components to fractions with lower boiling points. It has been established that when using the propane-butane fraction (compared with air), greater processing efficiency is achieved, which is probably due to the greater solubility of gaseous hydrocarbons in petroleum products.

Keywords: oil and petroleum products, hydrodynamic cavitation, intensification, sulfur content, sulfur-containing compounds, desulfurization, physical and chemical properties

Для цитирования:

Пешнев Б.В., Никишин Д.В., Николаев А.И., Королев А.Н. Влияние условий кавитационной обработки темных нефтепродуктов на содержание в них серы. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 12. С. 104–112. DOI: 10.6060/ivkkt.20256812.7170.

For citation:

Peshnev B.V., Nikishin D.V., Nikolaev A.I., Korolev A.N. Influence of cavitation treatment conditions of dark petroleum products on the sulfur content in them. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 12. P. 104–112. DOI: 10.6060/ivkkt.20256812.7170.

ВВЕДЕНИЕ

Отрицательное отношение к явлению кавитации, разрушающему лопасти турбин гидроэлектростанций и лопасти винтов морских и речных судов, давно уже сменилось интересом к возможности его использования в различных отраслях промышленности. Отдельное место в этом ряду занимают процессы, связанные с добычей, транспортировкой и переработкой нефти. Во многом это обусловлено сложной, коллоидно-дисперсной структурой нефти, состоящей из углеводородов и гетероатомных соединений различной молекулярной массы, строения, полярности. Межмолекулярные и внутримолекулярные взаимодействия этих компонентов приводят к возникновению в нефти сложных структурных единиц (ССЕ), существенно влияющих на её вязкость. Акустическое, гидродинамическое воздействие на нефтяную дисперсную систему может вызвать в ней явления кавитации, что позволяет разрушить ССЕ. В результате снижается вязкость нефти, увеличивается дебит скважины, снижаются затраты на транспортировку нефти [1, 2].

По некоторым оценкам, в результате схлопывания кавитационных пузырьков, температура в местах их коллапса может достигать 10000 К, а давление 1000 МПа [3]. Это, в свою очередь, приводит к изменению углеводородного состава обрабатываемых смесей [4-7], снижению их плотности, изменению фракционного состава [8-10].

В ряде работ отмечается [11-16], что под воздействием кавитации возможно окисление углеводородов в их смесях с водой. Указывается, что эти изменения возможны даже в случае отсутствия в обрабатываемой смеси растворённого кислорода. Предлагаемый авторами [11, 14] механизм предполагает разрыв, под воздействием выделившейся при схлопывании пузырьков энергии, связи Н-ОН, с образованием атомарного водорода и гидроксильного радикала, рекомбинацию гидроксильных радикалов в пероксид водорода и последующие реакции окисления. При этом также фиксировалось протекание реакций крекинга, циклизации, дегидроциклизации, конденсации.

Близи́хих взгля́дов на роль воды в химических превращениях углеводородов придержи́ва-

лись в работах [17-19] при изучении процесса десульфуризации нефти под воздействием кавитации. Авторы считают такой вариант десульфуризации нефти предпочтительнее гидроочистки, так как он позволяет проводить процесс без повышения температуры и давления. Следует отметить, что высокая степень очистки образцов от серы (95-100%) достигалась при начальном содержании серы ~500 ppm, что существенно ниже реальных значений, характерных прямогонным нефтепродуктам, выделенным из нативной нефти. Также следует отметить, что доля органической фазы в смеси с водой в этих исследованиях не превышала 10%, что также не соответствует реальным объектам.

Активное участие гидроксильных радикалов и атомарного водорода в химических превращениях углеводородов в результате кавитационных явлений вероятно только при наличии в реакционной смеси значительных количеств воды. В других условиях более вероятен разрыв связи C-S в серосодержащих соединениях (энергия разрыва связи 222-301 кДж/моль [20, 21]), связи C-C в алканах (энергия разрыва связи 226-332 кДж/моль), отрыв атома водорода от углеводородов (энергия разрыва связи 360-420 кДж/моль) или разрыв C-C связи в алкилароматических структурах (энергия разрыва связи ~380 кДж/моль). Для сравнения, энергия разрыва связи Н-ОН оценивается в 485-493 кДж/моль [22, 23]. Следует отметить, что в работе [24] также высказывается предположение о начале цепи превращений с разрыва связи C-S в углеводороде или связей C-S в гетероатомных структурах. В этой связи заслуживают внимания работы [25, 26], авторы которых отметили снижение содержания серы в образце в результате кавитационного воздействия. Они фиксировали образование сероводорода непосредственно в процессе обработки образца или при его последующем фракционировании.

В таком случае, если энергии, выделяющейся при схлопывании кавитационного пузырька, достаточно для разрыва связей C-S и C-C в углеводородах (гетероатомных соединениях), явление кавитации можно рассматривать как стадию активации нефтепродукта перед основным процессом [27, 28], в том числе и перед гидроочисткой.

Целью данной работы было исследование влияния условий проведения кавитации на изменение содержания серы в тёмных нефтепродуктах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования были выбраны мазут прямогонный, предоставленный АО «Газ-

промнефть-МНПЗ» (ПМ), гидроочищенный вакуумный газойль (ГВГ) и газойль каталитического крекинга (ГКК), предоставленные АО «Газпромнефть-МНПЗ». Их характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические характеристики объектов исследования

Table 1. Physico-chemical characteristics of the research objects

Показатель	Образец		
	ПМ	ГВГ	ГКК
Плотность, г/см ³	0,9542	0,9059	1,0024
Выход фракций, % масс.			
Т _{нк} -350 °С	6,9	5,6	55,5
350-400 °С	14,0	35,5	39,7
400-480 °С	27,2	49,4	
480 °С и выше	51,9	9,5	4,8
Групповой состав, % масс.			
Асфальтены	4,4	0,0	0,0
Смоли	13,3	3,9	1,8
Масла, в т.ч.	82,3	96,1	98,2
Насыщенные углеводороды	38,5	79,1	29,3
Ароматические углеводороды	43,8	17,0	68,9
Содержание серы, % масс.	2,51	0,12	0,71

Обработку образцов проводили в гидродинамическом режиме, используя аппарат ДА-1, принцип действия которого описан в работе [29] при давлениях 30 и 50 МПа и 1 или 5 циклах воздействия.

Для интенсификации явления кавитации в ряде экспериментов образцы предварительно насыщали газом или вводили низкокипящие углеводороды [30]. Газонасыщение осуществляли барботажем в течении 30 мин через образец (объём образца 300 мл) воздуха или пропан-бутановой фракции (ПБФ) состава (% об.): C₂H₆ ~ 15%, C₃H₈ ~ 65%, C₄H₁₀ ~ 20%. Расход газа варьировался от 100 до 300 мл/мин. В качестве низкокипящего углеводорода использовали декалин, доля которого в смеси с ПМ составляла 2 % масс.

В табл. 2 представлена нумерация и условия кавитационной обработки образца ПМ.

Плотность образцов определяли пикнометрическим методом при 20 °С, фракционный состав – перегонкой под вакуумом, а групповой углеводородный – в соответствии с методикой [31], в основе которой лежит различная растворимость насыщенных и ароматических углеводородов, смол и асфальтенов в полярных и неполярных растворителях.

Содержание серы в образцах определяли на анализаторе ЕА 1112, расчёт проводили в программе Eager 300. Для определения индивидуаль-

ного углеводородного состава образцов использовался газовый хромато-масс-спектрометр 5977B GC/MSD (фирмы Agilent Technologies, версия пакета базы данных – NIST 2017). Содержание фракций ароматических углеводородов и серосодержащих соединений определяли, используя метод внутренней нормализации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние условий обработки образца ПМ на изменение его характеристик и содержание серы показано в табл. 3 и на рис. 1.

Таблица 2

Нумерация и условия кавитационной обработки образца ПМ
Table 2. Numbering and conditions of cavitation treatment of the PM sample

№ образца	Количество циклов обработки	Перепад давления, МПа	Дополнительные компоненты	Расход газа при насыщении, мл/мин (или содержание вещества, % масс.)
1	-	-		
2	1	30		
3				
4				
5				
6				
7	5	50	Воздух	100
8			ПБФ	100
9			Воздух	150
10			ПБФ	150
11			Воздух	300
			ПБФ	200
			Декалин	(2,0)

Таблица 3

Влияние условий обработки образца ПМ на его плотность и выход фракций, выкипающих до 400 °С. Нумерация образцов в соответствии с табл. 2

Table 3. The influence of the processing conditions of the PM sample on its density and the yield of fractions boiling up to 400 °C. Numbering of samples in accordance with Table 2

Образец, №	Плотность, г/см ³	Выход фракций, выкипающих до 400 °С, % масс.	Образец, №	Плотность, г/см ³	Выход фракций, выкипающих до 400 °С, % масс.
1	0,9542	20,9	7	0,9477	26,1
2	0,9534	22,1	8	0,9443	28,1
3	0,9514	23,5	9	0,9456	27,8
4	0,9500	24,6	10	0,9437	29,1
5	0,9493	25,0			
6	0,9458	27,7	11	0,9497	25,9

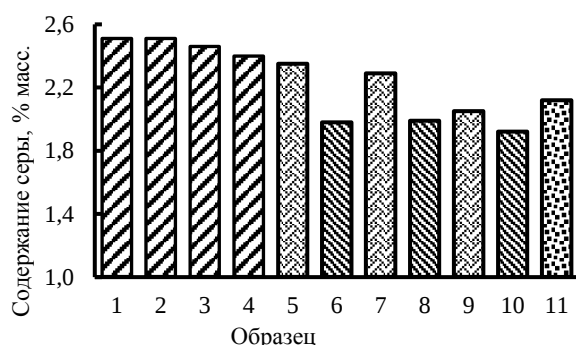


Рис. 1. Влияние условий обработки на содержание серы в образце ПМ: 1-11 – номера образцов в соответствии с табл. 2
Fig. 1. The effect of processing conditions on the sulfur content in the PM sample: 1-11 – sample numbers in accordance with Table 2

После однократной обработки образца при давлении 30 МПа изменения содержания серы не наблюдалось (2,51 % масс. у исходного образца ПМ и после его однократной обработки при 30 МПа), но его плотность при этом снизилась до 0,9534 г/см³ и увеличился выход фракций, выкипающих до 400 °С. Эти изменения согласуются с результатами других исследований [10, 27]. Повышение перепада давления или числа циклов воздействия сопровождалось увеличением выхода фракций, выкипающих до 400 °С, и снижением плотности образца. Особо следует отметить снижение содержания в образцах 3 и 4 серы (2,46 и 2,40 % масс. соответственно), при увеличении давления и числа циклов воздействия.

Насыщение образца воздухом или ПБФ (образцы 5-10) значительно усиливало эффект от кавитационной обработки, проявляющийся в более существенном снижении плотности образца, содержания в нём серы (до 1,92 % масс. у образца 10), увеличении выхода фракций, выкипающих до 400 °С). При этом эффект увеличивался по мере повышения расхода газа при продувке и был более выражен, когда использовалась пропан-бутановая фракция, а не воздух. Последнее можно объяснить большей растворимостью углеводородных газов в нефтепродуктах по сравнению с воздухом. Декалин по эффективности воздействия занимал промежуточное положение между воздухом и ПБФ.

Для образца ГВГ (при пятикратной обработке при 50 МПа) были получены аналогичные результаты. В случае предварительного газонасыщения образца воздухом (расход 200 мл/мин) содержание серы снизилось с 0,12 % масс. до 0,07 % масс. Если же использовалась ПБФ (расход 100 мл/мин), то содержание серы в образце после обработки составляло 0,01 % масс.

Особенностью образца ГКК является высокое содержание ароматических углеводородов (68,9 % масс.), а его серосодержащие компоненты представлены бенз- и дибензотиофенами. В результате однократной обработки этого образца при 50 МПа выход фракций, выкипающих до 400 °С, увеличился на 2,7%, а после пятикратной – на 4,0%, но ни в том, ни в другом случае снижения содержания серы в образце зафиксировано не было. Если перед кавитационной обработкой (5 циклов при 50 МПа) образец подвергался газонасыщению ПБФ, то фиксировалось снижение содержания серы, которое было тем существеннее, чем больше был расход газа. Например, при расходе газа 100 мл/мин содержание серы снизилось с 0,71 % масс. до 0,62 % масс., а при расходе 200 мл/мин – до 0,56 % масс. Выход фракций, выкипающих до 400 °С, увеличился при этом до 99,3 и 99,5 % масс., соответственно.

Помимо общего снижения содержания серы в образце под воздействием кавитации было зафиксировано изменение её содержания в отдельных фракциях (рис. 2). У исходного образца ПМ содержание серы в отдельных фракциях возрастало по мере повышения температур их выкипания. Пятикратная обработка образца при 50 МПа (образец 4) привела к снижению содержания серы в образце в целом. Но в отдельных его фракциях такое снижение было отмечено только для фракции, выкипающей выше 480 °С (от 3,69 % масс. для образца 1, до 3,44 % масс. у образца 4). Уверенно

говорить об изменении содержания серы во фракции 400-480 °С затруднительно (2,21 % масс. образец 1 и 2,23 % масс. образец 4), а во фракциях НК-350 °С и 350-400 °С после обработки наблюдалось некоторое увеличение содержания серы (от 1,95 до 2,06 % масс, и от 2,09 до 2,20 % масс., соответственно). Предварительное насыщение образца ПБФ (образец 6) интенсифицировало процесс кавитации и привело к большему снижению содержания серы во фракции 480+°С (до 3,41 % масс.). Также снизилась её концентрация во фракциях НК-350 °С и 350-400 °С (1,71 и 1,91 % масс., что ниже исходных значений), а во фракции 400-480 °С содержание серы увеличилось до 2,35 % масс. и превысило начальные значения.

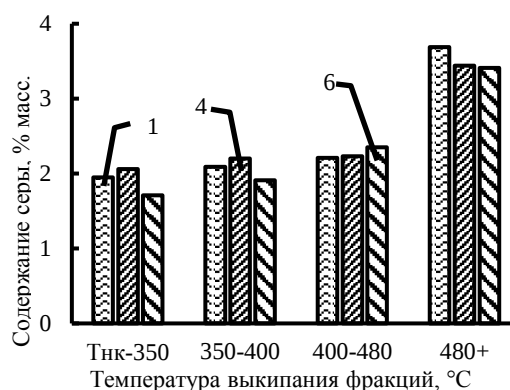


Рис. 2. Влияние условий кавитационной обработки образца на содержание серы в отдельных фракциях: 1, 4, 6 – образцы в соответствии с табл. 2

Fig. 2. The effect of cavitation treatment conditions on the sulfur content in individual fractions: 1, 4, 6 – samples in accordance with Table 2

Наиболее вероятно, что причина изменения содержания серы в отдельных фракциях нефтепродукта заключается в особенностях протекания явления кавитации. Кавитационные пузырьки, возникающие в жидкой фазе в результате изменения давлений, по мнению авторов работ [32-34], локализуются на границах раздела фаз. В нефтепродуктах, особенно тёмных, такие границы возникают между дисперсной средой и ССЕ дисперсной фазы, сформированными смолами и асфальтенами, содержащими гетероатомы. В таком случае, тепло, выделяющееся при схлопывании кавитационных пузырьков, должно наиболее значимо воздействовать на ССЕ. Следовательно, наибольшим деструктивным изменениям должны быть подвержены смолы и асфальтены. Действительно, после 5 циклов обработки при 50 МПа, содержание смол и асфальтенов в образце ПМ снизилось с 13,3 и 4,4 % масс. до 12,0 и 3,7 % масс. соответственно. Продукты их

превращений, в том числе содержащие серу, при этом перераспределяются по фракциям с меньшими температурами кипения. В табл. 4 пред-

ставлены результаты хромато-масс-спектроскопии фракций Т_{НК}-350 °С образца ПМ и продуктов его кавитационной обработки в различных режимах.

Таблица 4

Влияние условий обработки образца ПМ на содержание и состав ароматических соединений фракции, выкипающей до 350 °С, %. Нумерация образцов в соответствии с табл. 2

Table 4. The influence of PM sample processing conditions on the content and composition of aromatic compounds of the fraction boiling up to 350 °С, %. The numbering of samples in accordance with Table 2

Структура	Образец							
	1	2	3	4	6	9	10	11
Нафталин и его производные	3,39	6,82	4,39	6,84	5,94	5,18	3,81	6,64
Бифенил и его производные	0,59	0,69	0,65	0,58	0,58	0,38	0,50	0,27
Флуорен и его производные	1,38	1,29	0,78	1,41	1,42	1,13	1,04	0,44
Фенантрен и его производные	1,72	2,75	3,99	3,12	2,45	2,80	3,50	3,10
Бензтиофен, дибензтиофен и их производные	3,09	3,74	3,83	3,73	2,56	2,93	2,82	4,81
Всего ароматических структур	10,17	15,29	13,64	15,68	12,95	12,42	11,67	15,26

Действительно, после кавитационного воздействия в светлых фракциях увеличилось содержание ароматических структур и при этом изменился их состав – стало больше (в относительном выражении) производных нафталина, снизилось содержание производных бензтиофена и дибензтиофена. Для последних, в результате кавитационного воздействия, было отмечено снижение доли метилбензтиофенов и увеличение доли диметилдибензтиофенов. Суммарное содержание голаядерных структур (бензтиофена, дибензтиофена) во всех случаях не превышало 0,6% и обеспечивалось преимущественно дибензтиофеном. Такие изменения можно рассматривать как подтверждение предположения о преимущественной деструкции смол и асфальтенов при кавитационной обработке тёмных нефтепродуктов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты свидетельствуют о возможности десульфуризации нефтяных фракций их кавитационной обработкой. Они подтверждают предположение о локализации кавитационных пузырьков на границах ССЕ и сольватного слоя, в результате чего именно эти составляющие нефтяных дисперсных систем подвергаются наибольшему

термическому воздействию при схлопывании пузырьков кавитации. В результате деструкции смол и асфальтенов, особенно их структурных фрагментов, содержащих гетероатомы, снижается содержание серы в образце в целом и во фракции, выкипающей выше 480 °С. Перераспределение серы по фракциям с меньшими температурами кипения зависит от условий проведения обработки (давления, числа циклов, наличия иницирующих компонентов). Показано, что введение в образец углеводородных газов интенсифицирует процесс кавитации.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП РТУ МИРЭА при поддержке Минобрнауки России в рамках Соглашения № 075-15-2021-689 от 01.09.2021 г.

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

This work was performed using the equipment of the Shared Science and Training Center for Collective Use RTU MIREA and supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of agreement No. 075-15-2021-689 dated 01.09.2021.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Муллакаев М.С., Салтыков А.А., Салтыков Ю.А., Муллакаев Р.М., Раянов А.Р., Прачкин В.Г. Анализ существующего акустического оборудования и технологий его применения для повышения нефтеотдачи. *Геология, геофизика и разраб. нефт. и газ. месторожд.* 2019. № 10. С. 60-70. DOI: 10.30713/2413-5011-2019-10(334)-60-70.

REFERENCES

1. Mullakaev M.S., Saltykov A.A., Saltykov Yu.A., Mullakaev R.M., Rayanov A.R., Prachkin V.G. Analysis of the existing acoustic equipment and technologies of its application to enhanced oil recovery. *Geologiya, Geofizika Razrab. Neft. Gaz. Mestorozhd.* 2019. N 10. P. 60-70 (in Russian). DOI: 10.30713/2413-5011-2019-10(334)-60-70.

2. Промтов М.А., Гатапова Н.Ц., Борщев В.Я., Колиух А.Н., Степанов А.Ю., Шейна О.А. Влияние гидроимпульсной обработки на реологические параметры нефти. *Вестн. ТГТУ*. 2020. Т. 26. № 2. С. 243-253. DOI: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.243-253.
3. Грумондз В.Т. Нанотехнологии обработки углеводородных жидкостей, основанные на использовании физико-химических явлений, происходящих на границах фаз и при фазовых переходах в условиях пузырьковой кавитации. *Вестн. Нижнегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского*. 2011. № 4 (5). С. 2120-2122.
4. Торховский В.Н., Антонюк С.Н., Воробьев С.И., Николаева М.В. Превращение короткоцепных n-алканов под действием гидродинамической кавитации. *Тонкие хим. технологии*. 2017. Т.12. № 5. С. 65-70. DOI: 10.32362/2410-6593-2017-12-5-65-70.
5. Song G., Wang D., Zhang Z., Liu M., Xu Q., Zhao D. Novel ultrasonic-assisted method for enhanced yield of light oil in the thermal cracking of residual oil. *Ultrason. Sonochem.* 2018. V. 48. P. 103-109. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.05.029.
6. Надилов Н.К., Ширинских А.В., Нуржанова С.Б., Солдодова Е.В., Таныбаева А.К., Зайтова С.Т. Технология переработки тяжелого углеводородного сырья механоволновым способом. *Вестн. Евраз. науки*. 2019. Т. 11. № 6. С. 91-98.
7. Есентаева Н.А. Кавитационная обработка тяжелой фракции нефти. Сб. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. Science and technology research. Петрозаводск. 2022. С. 179-184.
8. Хамидуллин Р.Ф., Харлампиди Х.Э., Никулин Р.М., Ситало А.В., Шараф Ф.А. Увеличение выхода светлых дистиллятов при помощи активации нефтяного сырья. *Химия и технология топлив*. 2016. № 6 (598). С. 29-34. DOI: 10.1007/s10553-017-0759-9.
9. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов. *Вестн. ТГТУ*. 2008. Т. 14. № 4. С. 861-869.
10. Терентьева В.Б., Пешнев Б.В., Николаев А.И. Гидродинамическая активация тяжелых нефтяных остатков. *Тонкие хим. технологии*. 2021. № 16 (5). С. 390-398. DOI: 10.32362/2410-6593-2021-16-5-390-398.
11. Арсентьев С.Д. Звукохимические превращения метана и этилена в водных растворах в условиях кавитации. *Журн. физ. химии*. 2020. Т. 94. № 9. С. 1355-1360. DOI: 10.31857/S0044453720090022.
12. Батоева А.А., Хандархаева М.С., Сизых М.Р., Рязанцев А.А. Кавитационная активация процесса гальванохимического окисления фенола. *Журн. прикл. химии*. 2010. Т. 83. № 1. С. 74-77.
13. Иванцова Н.А. Окисление фенола при ультразвуковом воздействии в присутствии пероксида водорода. *Наукаосфера*. 2020. № 12 (2). С. 214-218.
14. Дудкин Д.В., Федяева И.М., Журавлева Л.А. Химические превращения изоалканов на оксиде алюминия при гидродинамическом кавитационном воздействии водных сред. *Вестн. ТвГУ. Сер. "Химия"*. 2020. № 3 (41). С. 88-101. DOI: 10.26456/vtchem2020.3.10.
15. Кухарчук И.Г. Ультразвуковое воздействие на компоненты углеводородного топлива. *Вестн. Нац. акад. наук. Беларуси. Сер. физ.-техн. наук*. 2015. № 2. С. 77-81.
16. Дудкин Д.В., Федяева И.М., Журавлева Л.А. Химические превращения n-алканов при гидродинамическом
2. Promptov M.A., Gatapova N.Z., Borshev V.YA., Koliukh A.N., Stepanov A.YU., Sheina O.A. The influence of hydropulse processing on rheological oil parameters. *Vestn. TGTU*. 2020. V. 26. N 2. P. 243-253 (in Russian). DOI: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.243-253.
3. Grumondz V.T. Nano-technology of oil refining using physical-chemical phenomena of bubble cavitation. *Vestn. Nizhegorod. Univ. im. N.I. Lobachevskogo*. 2011. N 4 (5). P. 2120-2122 (in Russian).
4. Torkhovskiy V.N., Antonyuk S.N., Vorobyev S.I., Nikolaeva M.V. Transformation of short-chain n-alkanes under treatment of hydrodynamic cavitation. *Tonkie Khim. Tekhnol.* 2017. V. 12. N 5. P. 65-70 (in Russian). DOI: 10.32362/2410-6593-2017-12-5-65-70.
5. Song G., Wang D., Zhang Z., Liu M., Xu Q., Zhao D. Novel ultrasonic-assisted method for enhanced yield of light oil in the thermal cracking of residual oil. *Ultrason. Sonochem.* 2018. V. 48. P. 103-109. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.05.029.
6. Nadirov N.K., Shirinskiy A.V., Nurzhanova S.B., Solodova E.V., Tanybaeva A.K., Zaitova S.T. Processing technology of heavy hydrocarbons raw by mechano-wave method. *Vestn. Evraz. Nauki*. 2019. V. 11. N 6. P. 91-98 (in Russian).
7. Yessentayeva N.A. Cavitation treatment of heavy oil. Proceedings of the II International Scientific and Practical Congress on Science and Technology 2022. Petrozavodsk. 2022. P. 179-183 (in Russian).
8. Khamidullin R.F., Kharlampidi Kh.E., Nikulin R.M., Sitalo A.V., Sharaf F.A. Increasing yield of light distillates by activation of oil stock. *Khim. Tekhnol. Topliv*. 2016. N 6 (598). P. 29-34 (in Russian). DOI: 10.1007/s10553-017-0759-9.
9. Promptov M.A. Prospects of Cavitation Technologies Application for Intensification of Chemical Technological Processes. *Vestn. TGTU*. 2008. V. 14. N 4. P. 861-869 (in Russian).
10. Terenteva V.B., Peshnev B.V., Nikolaev A.I. Hydrodynamic activation of heavy oil residues. *Tonkie Khim. Tekhnol.* 2021. N 16 (5). P. 390-398 (in Russian). DOI: 10.32362/2410-6593-2021-16-5-390-398.
11. Arsentev S.D. Sonochemical Transformations of Methane and Ethylene in Aqueous Solutions under Conditions of Cavitation. *Russ. J. Phys. Chem. A*. 2020. V. 94. N 9. P. 1811-1815. DOI: 10.1134/S0036024420090022.
12. Batoeva A.A., Khandarkhaeva M.S., Sizykh M.R., Ryzantsev A.A. Cavitation Activation of the Galvanochemical Oxidation of Phenol. *Russ. J. Appl. Chem.* 2010. V. 83. N 1. P. 72-75. DOI: 10.1134/S1070427210010155.
13. Ivantsova N.A. Oxidation of phenol by ultrasonic action in the presence of hydrogen peroxide. *Naukosfera*. 2020. N 12 (2). P. 214-218 (in Russian).
14. Dudkin D.V., Fedyeva I.M., Zhuravleva L.A. Chemical transformations of isoalkanes on aluminum oxide under hydrodynamic cavitation action of water media. *Vestn. TvGU. Ser. Khimiya*. 2020. N 3 (41). P. 88-101 (in Russian). DOI: 10.26456/vtchem2020.3.10.
15. Kukharchuk I.G. Ultrasonic action on hydrocarbon fuel components. *Ves. Nats. Akad. Nav. Belarusi. Ser. Fiz.-Tekhn. nauk*. 2015. N 2. P. 77-81 (in Russian).
16. Dudkin D.V., Fedyeva I.M., Zhuravleva L.A. Chemical transformations of n-alkanes under the hydrodynamic cavi-

- кавитационном воздействии водных сред. Сб. тр. междунар. науч. форума «Наука и инновации – современные концепции». Москва. 2020. С. 158-166.
17. **Suryawanshi N.B., Bhandari V.M., Sorokhaibam L.G., Ranade V.V.** Non-catalytic Deep Desulphurization Process using Hydrodynamic Cavitation. *Sci. Rep.* 2016. V. 6. 33021. DOI: 10.1038/srep33021.
 18. **Suryawanshi N.B., Bhandari V.M., Sorokhaibam L.G., Ranade V.V.** Developing techno-economically sustainable methodologies for deep desulfurization using hydrodynamic cavitation. *Fuel*. 2017. V. 210. P. 482-490. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.08.106.
 19. **Ju H.-J., Jeon S.-K.** Effect of Ultrasound Irradiation on the Properties and Sulfur Contents of Blended Very Low-Sulfur Fuel Oil (VLSFO). *J. Marine Sci. Eng.* 2022. V. 10. P. 980. DOI: 10.3390/jmse10070980.
 20. **Сунагатуллин Р.З., Кутуков С.Е., Гольянов А.И., Четверткова О.В., Зверев Ф.С.** Управление реологическими характеристиками нефтей физическими методами воздействия. *Нефть. хоз-во.* 2021. № 1. С. 92-97. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-1-92-97.
 21. **Ахметов С.А., Сериков Т.П., Кузеев И.Р., Байazitov M.И.** Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа. СПб.: Недра. 2006. 868 с.
 22. Краткий справочник физико-химических величин. Под ред. К.П. Мищенко, А.А. Равделя. Л.: Химия. 1974. 200 с.
 23. **Сыркин Я.К., Дяткина М.Е.** Химическая связь и строение молекул. М., Л.: Госхимиздат. 1946. 591 с.
 24. **Liu J., Yang F., Xia J., Wu F., Pu C.** Mechanism of Ultrasonic Physical–Chemical Viscosity Reduction for Different Heavy Oils. *ACS Omega*. 2021. V. 6. N 3. P. 2276-2283. DOI: 10.1021/acsomega.0c05585.
 25. **Набиуллин Н.Н., Солодова Н.Л., Фахрутдинов Р.З., Гиззатуллин Э.А.** Акустическое воздействие на нефтяное сырье. Сб. тр. Всеросс. науч.-практ. конф. студ., асп., мол. уч. и спец. «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе». Тюмень. 2013. С. 150-154.
 26. **Taheri-Shakib J., Shekarifard A., Naderi H.** The experimental investigation of effect of microwave and ultrasonic waves on the key characteristics of heavy crude oil. *J. Analyt. Appl. Pyrol.* 2017. V. 128. P. 92–101. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.10.021.
 27. **Торховский В.Н., Антонюк П.С., Антонюк С.Н., Воробьев С.И.** Использование гидродинамической кавитации для увеличения глубины отбора вакуумных дистиллятов при переработке битуминозных углеводородов. Сб. тр. «Нетрадиционные природные ресурсы, инновационные технологии и продукты». Москва. 2016. Т. 23. С. 81-85.
 28. **Винокуров В.А., Фролов В.И., Крестовников М.П., Лесин С.В., Шишкин Ю.Л.** Исследование влияния волнового воздействия на нефти. *Нефтеперераб. и нефтехимия. Науч.-техн. достиж. и передовой опыт.* 2012. № 8. С. 3-8.
 29. **Воробьев С.И., Торховский В.Н., Тutorsкий И.А., Казмалы И.К.** Механодеструкция углеводородов нефти с помощью дезинтегратора высокого давления. *Вестн. МИТХТ.* 2008. Т. 3. № 3. С. 78–85.
 30. **Никишин Д.В., Пешнев Б.В., Николаев А.И., Шебаршинова П.М.** Интенсификация процесса кавитационной
 - tion effect of aqueous media. Sat. tr. of the International scientific forum "Science and Innovation – modern concepts". Moscow. 2020. P. 158-166 (in Russian).
 17. **Suryawanshi N.B., Bhandari V.M., Sorokhaibam L.G., Ranade V.V.** Non-catalytic Deep Desulphurization Process using Hydrodynamic Cavitation. *Sci. Rep.* 2016. V. 6. 33021. DOI: 10.1038/srep33021.
 18. **Suryawanshi N.B., Bhandari V.M., Sorokhaibam L.G., Ranade V.V.** Developing techno-economically sustainable methodologies for deep desulfurization using hydrodynamic cavitation. *Fuel*. 2017. V. 210. P. 482-490. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.08.106.
 19. **Ju H.-J., Jeon S.-K.** Effect of Ultrasound Irradiation on the Properties and Sulfur Contents of Blended Very Low-Sulfur Fuel Oil (VLSFO). *J. Marine Sci. Eng.* 2022. V. 10. P. 980. DOI: 10.3390/jmse10070980.
 20. **Sunagatullin R.Z., Kutukov S.E., Golianov A.I., Chetvertkova O.V., Zverev F.V.** Control of oil rheological properties by exposure to physical methods. *Neft. Khoz-vo.* 2021. N 1. P. 92-97 (in Russian). DOI: 10.24887/0028-2448-2021-1-92-97.
 21. **Akhmetov S. A., Serikov T. P., Kuzeev I. R., Bayazitov M. I.** Technology and equipment of oil and gas refining processes. St. P.: Nedra. 2006. 868 p. (in Russian).
 22. A short reference book of physico-chemical quantities. Ed. by K.P. Mishchenko, A.A. Ravdel. L.: Khimiya. 1974. 200 p. (in Russian).
 23. **Syrkin Ya.K., Dyatkina M.E.** Chemical bond and structure of molecules. M., L.: Goskhimizdat. 1946. 591 p. (in Russian).
 24. **Liu J., Yang F., Xia J., Wu F., Pu C.** Mechanism of Ultrasonic Physical–Chemical Viscosity Reduction for Different Heavy Oils. *ACS Omega*. 2021. V. 6. N 3. P. 2276-2283. DOI: 10.1021/acsomega.0c05585.
 25. **Nabiullin N.N., Solodova N.L., Fakhrutdinov R.Z., Gizzatullin E.A.** Acoustic effect on petroleum raw materials. Collection of the All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates, young scientists and specialists "Energy saving and innovative technologies in the fuel and energy complex". Tyumen. 2013. P. 150-154. (in Russian).
 26. **Taheri-Shakib J., Shekarifard A., Naderi H.** The experimental investigation of effect of microwave and ultrasonic waves on the key characteristics of heavy crude oil. *J. Analyt. Appl. Pyrol.* 2017. V. 128. P. 92–101. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.10.021.
 27. **Torkhovskiy V.N., Antonyuk P.S., Antonyuk S.N., Vorobyov S.I.** The use of hydrodynamic cavitation to increase the depth of selection of vacuum distillates in the processing of bituminous hydrocarbons. Collection of tr. "Unconventional natural resources, innovative technologies and products". Moscow. 2016. V. 23. P. 81-85. (in Russian).
 28. **Vinokurov V.A., Frolov V.I., Krestovnikov M.P., Lesin S.V., Shishkin Yu.L.** Investigation of the effect of wave action on oil. *Neftepererab. Neftekhim. Nauch.-Tekhn. Dostizh. Peredovoj Opyt.* 2012. N 8. P. 3-8 (in Russian).
 29. **Vorobyev S.I., Torkhovskiy V.N., Tutorsky I.A., Kazmaly I.K.** Mechanodestruction of raw oil hydrocarbons by high-pressure disintegrator. *Vestn. MITHT.* 2008. V. 3. N 3. P. 78-85 (in Russian).
 30. **Nikishin D.V., Peshnev B.V., Nikolaev A.I., Shebarshinova P.M.** Intensification process of cavitation treatment of the heavy

- обработки тяжелого нефтяного сырья. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 9. С. 111-117. DOI: 10.6060/ivkkt.20246709.7012.
31. Сафина И.Р., Ибрагимова Д.А., Яушев Э.А., Хисмиев Р.Р. Применение метода SARA-анализа для характеристики нефтяных дисперсных систем. *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2014. Т. 17. № 24. С. 212-213.
32. Витенько Т.Н., Гумницкий Я.М. Механизм активирующего действия гидродинамической кавитации на воду. *Химия и технология воды*. 2007. Т. 29. № 5. С. 422-432. DOI: 10.3103/S1063455X07050037.
33. Ершов М.А., Муллакаев М.А., Баранов Д.А. Снижение вязкости парафинистых нефтей обработкой в гидродинамическом проточном реакторе. *Оборуд. и технол. для нефтегаз. комплекса*. 2011. № 4. С. 22-26.
34. 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.
- oil feedstock. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 9. P. 111-117 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246709.7012.
31. Safina I.R., Ibragimova D.A., Yaushev E.A., Khismiev R.R. Application of the SARA analysis method to characterize petroleum dispersed systems. *Vestn. Kazan. Tekhnol. Univ.* 2014. V. 17. N 24. P. 212-213 (in Russian).
32. Vitenko T.N., Gumnitsky Ya.M. The mechanism of activating action of hydrodynamic cavitation on water. *Khim. Tekhnol. Vody*. 2007. V. 29. N 5. P. 422-432 (in Russian). DOI: 10.3103/S1063455X07050037.
33. Ershov M.A., Mullakaev M.A., Baranov D.A. Reduction of viscosity of paraffinic oils by treatment in a hydrodynamic flow reactor. *Oborud. Tekhnol. Neftegaz. Kompleksa*. 2011. N 4. P. 22-26 (in Russian).
34. Nikolaev A.I., Peshnev B.V., Alhamedy 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.

Поступила в редакцию 18.11.2024

Принята к опубликованию 06.06.2025

Received 18.11.2024

Accepted 06.06.2025