

УДК 504.064.45
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4607
Шифр специальности ВАК: 2.4.6

Совершенствование технологий утилизации отходов нефтепродуктов

Т.А. Кулагина✉, О.Г. Дубровская, Е.Н. Зайцева, Р.Н. Крылышкин

Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск

✉tak.sfu@gmail.com

Аннотация. Актуальность. В настоящее время особое значение приобретает рациональное и экономное использование нефтепродуктов. Это относится, в том числе, и ко всем известным видам масел. Отработанные масла, попадающие в окружающую природную среду, лишь частично обезвреживаются в результате естественных процессов. Большая их часть является источником загрязнения почв, водных объектов и атмосферного воздуха, приводя к нарушению воспроизводства птиц, рыб, млекопитающих, оказывая вредное воздействие на человека. Таким образом, повсеместная проблема сбора и утилизации отработанных нефтепродуктов является актуальной, рентабельной и наукоемкой областью, так как при правильной организации процесса регенерации стоимость восстановленных масел на 40–70 % ниже стоимости свежих масел при практически одинаковом их качестве. **Цель.** Цель работы заключается в совершенствовании технологии утилизации отработанных нефтепродуктов в условиях северных территорий для достижения эко- и энергоэффективности. Отработанные масла после этапа регенерации могут использоваться по прямому назначению – возвращаться в системы смазки оборудования, это до 70–80 % от исходного количества образующегося отработанного масла. Оставшееся, «невозстановленное», в количестве 20–30 % – сжигаться в виде водотопливной смеси на предприятиях, оборудованных котлами на жидком топливе. Имеющихся в литературных источниках сведений недостаточно для создания эффективной системы утилизации отработанных масел и других нефтепродуктов особенно в условиях циркумполярных территорий. Требуется дифференцированный подход к проблеме с учетом особенностей климата, удаленности арктических территорий от транспортных инфраструктур с обязательным соблюдением регламентов защиты окружающей среды. **Методы.** Кавитационная технология (эффекты кавитации) и метод глубокого обучения LSTM (Long Short-Term Memory) для обработки отходов углеводородов на примере индустриального масла W30 и, соответственно, моделирование миграции поллютантов от промышленных объектов в открытых природных водных источниках. **Результаты и выводы.** Полученные результаты говорят о том, что комплексное использование сырья – это результат наиболее полного, экономически и экологически оправданного использования всех полезных компонентов, содержащихся в сырье, а также в отходах производства. Любые углеводородные отходы можно рассматривать в качестве вторичных материальных ресурсов, которые допустимо использовать в хозяйственных целях, частично или полностью замещая традиционные виды материально-сырьевых и топливно-энергетических ресурсов, главной ценностью которых является их постоянная воспроизводимость в производственном секторе.

Ключевые слова: нефтесодержащие отходы, утилизация, кавитационное воздействие, энергетические ресурсы, окружающая природная среда

Для цитирования: Совершенствование технологий утилизации отходов нефтепродуктов / Т.А. Кулагина, О.Г. Дубровская, Е.Н. Зайцева, Р.Н. Крылышкин // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 46–54. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4607

UDC 504.064.45
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4607

Improvement of technologies for recycling waste petroleum

T.A. Kulagina✉, O.G. Dubrovskaya, E.N. Zaytseva, R.N. Krylyshkin

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉tak.sfu@gmail.com

Abstract. Relevance. Currently, the rational and economical use of petroleum products is of particular importance. This applies, among other things, to all known types of oils. Waste oils entering the natural environment are only partially neutralized as a result of natural processes. Most of them are a source of pollution of soils, water bodies and atmospheric air, leading to disruption of the reproduction of birds, fish, mammals, and having a harmful effect on humans. Thus, the widespread problem of collecting and recycling waste petroleum products is a relevant, cost-effective and knowledge-intensive area; since with the correct organization of regeneration, the cost of recovered oil is 40–70% lower than the cost of fresh oils with almost the same quality. **Aim.** To improve the technology of recycling spent petroleum products in the conditions of the northern territories in order to achieve eco- and energy efficiency. After the regeneration stage, used oils can be used for their intended purpose – returned to equipment lubrication systems, this is up to 70–80% of the original amount of waste oil generated. The remaining, “unrecovered” amount of 20–30% is burned in the form of a water-fuel mixture at enterprises equipped with liquid fuel boilers. The information available in the literature is insufficient to create an effective system for the disposal of used oils and other petroleum products, especially in the circumpolar territories. A differentiated approach to the problem is required, taking into account the peculiarities of the climate, the remoteness of the Arctic territories from the transport infrastructure, with mandatory compliance with environmental standards. **Methods.** Cavitation technology (i. e. cavitation effects) and the LSTM (Long Short-Term Memory) deep learning method for processing hydrocarbon waste using the example of industrial oil W30 and, accordingly, modeling the migration of pollutants from industrial objects in open natural water sources. **Results and conclusions.** The results obtained indicate that the integrated use of raw materials is the result of the most complete, economically and environmentally justified application of all advantageous components contained in raw materials, as well as in production waste. Any hydrocarbon waste can be considered as secondary material resources that can be used for economic purposes, partially or completely replacing traditional types of material, raw materials and fuel and energy resources, the main value of which is their constant reproducibility in the production sector.

Keywords: oily waste, recycling, cavitation effects, energy resources, natural environment

For citation: Kulagina T.A., Dubrovskaya O.G. Zaytseva E.N., Krylyshkin R.N. Improvement of technologies for recycling waste petroleum. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 46–54. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4607

Введение

Ежегодно в России потребляется порядка 1,85 млн т масел, при этом собирается всего около 500 тыс. Согласно действующему Временному положению об организации сбора и рационального использования отработанных нефтепродуктов величина среднего показателя норматива сбора по отработанным маслам составляет 0,5. То есть от годового количества потребления сбор должен составлять 925 тыс. т отработанного масла. Существующие в стране легальные мощности по утилизации [1] готовы ежегодно перерабатывать около 100 т, а значит, не учтенными остаются порядка 400 т нефтепродуктов.

Отработанные нефтяные масла и смазочные материалы, не вовлеченные в процесс утилизации [2], попадают в незаконный оборот топливных продуктов, которые, являясь преимущественно отходами 3-го класса опасности, сжигаются, загрязняя окружающую среду бесконтрольными выбросами опасных продуктов горения [3].

По данным источника [4] более благополучные ситуации с отработанными нефтепродуктами складываются:

- в европейской части страны (Вологодская, Курская, Смоленская, Саратовская области, республика Коми, республика Татарстан и пр.), где осуществляется сбор и накопление масел;
- Красноярском и Краснодарском крае, Волгоградской, Иркутской, Томской, Новосибирской и Амурской областях – сбор и утилизация.

В республике Удмуртия, Омской области, Алтайском и Приморском крае ведутся поиск и переговоры с потенциальными партнерами переработчиками.

Количественные показатели сбора отработанных масел от объемов потребляемого исходного смазочного материала по субъектам РФ складываются так (%):

- Центральный – 150,8;
- Приволжский – 108,8;
- Уральский – 102,1;
- Сибирский – 70,4;
- Северо-западный – 58,5;
- Южный – 56,3;
- Дальневосточный – 29,1.

Ту же величину сбора, но относительно сфер образования отработанных масел можно представить так (%):

- промышленность – 290,6;
- физические лица – 68,5;
- строительство – 47,8;
- автомобильный транспорт – 37,3;
- сельское хозяйство – 35,1;
- армия – 13,1;
- ж/д транспорт – 8,8;
- флот – 5,4;
- авиация – 4,4;
- прочее – 65,3;

Экологически безопасное использование отработанных смазочных материалов предполагает их

переработку с получением товарных продуктов самого различного назначения (топлив, масел, пластичных смазок, СОТС, консервационных материалов и др.) [5]. Современное состояние вопроса безопасной утилизации сталкивается с трудностями и в теории, и на практике [6].

Восстановленное топливо не уступает качеству первично изготовленного, в отработанном масле доля содержания ценных углеводородов достаточно высока [7]. Из отработок удаляются механические примеси, продукты окисления, а глубина очистки дает максимальный выход базового масла [8].

Оптимальный метод утилизации должен сочетать в себе следующие характеристики:

- высокое качество очистки;
- экономичность технологии;
- возможность переработки максимального объема отработанного масла;
- минимально возможная продолжительность процесса;
- максимальная автоматизация производственных операций;
- безопасность для человека и окружающей среды;
- получение вторичного сырья, востребованного на рынке [9].

Отработанные масла после этапа регенерации могут использоваться по прямому назначению – возвращаться в системы смазки оборудования, это до 75–80 % от исходного количества образующегося отработанного масла, оставшееся, «невосстановленное», в количестве 20–25 % – сжигается в виде водотопливной смеси на предприятиях, оборудованных котлами на жидком топливе. Действующие требования Росприроднадзора по прекращению бесцельного сжигания отработанных масел ставят задачу получения из отработанных промышленных масел двух видов товарного продукта: исходного масла и топлива.

Специфические свойства водотопливной смеси определяются свойствами составляющих системы жидкость–жидкость [10]. Углеводородсодержащие отходы [11] характеризуются повышенной вязкостью, наличием крупных и абразивных частиц дисперсной фазы, склонной к образованию осадков [12], и рядом других отклонений от стандартных топлив, препятствующих использованию этих топлив вместо топливного мазута без специальной обработки [13].

Кавитационная обработка [14], способствующая активации жидких сред [15], изменяющая свойства и интенсифицирующая химико-технологические процессы, может применяться как непосредственно к отработанным промышленным маслам с целью улучшения их физико-химических характеристик [16] и к водотопливным смесям для создания

устойчивых эмульсий [17], так и к воде, изменяя ее физико-химическое состояние.

Целью работы было оценить влияние кавитационного воздействия на свойства отработанных промышленных масел и их возможный возврат в хозяйственную деятельность предприятий, а также воды и её структурных изменений до и после заморозки для эффективного использования при создании водотопливных эмульсий для сжигания в малых котельных районах Крайнего севера.

Материалы и методы

В эксперименте исследовалась активированная вода до и после замораживания, а также три пробы промышленного масла W30:

- исходное матричное масло – проба № 1;
- отработанное масло – проба № 2;
- отработанное масло после кавитационного воздействия – пробы № 3а и 3б.

Двенадцать проб воды, каждая по 500 мл, подверглись кавитационной обработке: время обработки 1, 3, 5 и 10 мин, скорость вращения кавитатора в каждом случае составляло 5, 10 и 15 тыс. оборотов в мин. Следом за каждым воздействием проба анализировалась по величине водородного показателя рН, удельной электропроводности (УЭП), температуре. После поочередной разморозки у исследуемых образцов измерялись следующие параметры:

- для воды – водородный показатель рН, УЭП, солесодержание, жесткость, щелочность и температура;
- для отработанного масла – водородный показатель, вязкость и коэффициент фильтрации.

Исследования проводились с использованием следующего оборудования: термометр лабораторный ТЛ-4, рН-метр/ионметр ИТАН, кондуктометр МАРК 603, вискозиметр ВПЖТ-1, фильтрационный аппарат УОФТ, морозильная камера Бирюса. Для определения жесткости воды использовались МУ 08-47/234, щелочности МУ 08-47/232. Кавитационная обработка выполнялась на установках двух типов: ультразвуковом генераторе и суперкавитационном миксере марка Silverston 5L.

Работа с отработанным маслом проводилась в два этапа:

- 1) для исходного и отработанного масла были определены параметры вязкости, значение рН и коэффициенты фильтрации;
- 2) отработанное масло, представленное пробой № 2, подвергли кавитационной обработке двумя способами: ультразвуковой, мощностью 400 Гц, и в суперкавитационном миксере при числе оборотов ротора 7600 об/мин, с последующим определением заявленных ранее физико-химических характеристик. Время обработки составило, соответственно: 5, 7, 10 и 15 мин.

Результаты исследования и их обсуждение

Значения показателей и анализируемых данных по активированной воде представлены в табл. 1. Графическую зависимость полученных числовых значений параметров активированной воды после заморозки можно увидеть на рис. 1.

При работе любые виды смазочных материалов соприкасаются с металлами, подвергаются воздействию температуры, давления, кислорода воздуха, минеральных примесей и других факторов, под влиянием которых с течением времени происходит изменение свойств масла, называемое старением (табл. 2) [13].

Кавитационная обработка отработанных индустриальных масел способствовала изменению их физико-химических свойств: вязкости, величины водородного показателя, минерального состава, что подтверждается следующими результатами.

Показатели вязкости заявленных образцов (табл. 3) исходного и отработанного масел были определены по формуле (1) по ГОСТ 33-2016:

$$\nu = Ct_{cp}, \quad (1)$$

где C – постоянная вискозиметра, $\text{мм}^2/\text{с}^2$; t_{cp} – среднеарифметическое значение времени обработки, с.

Величина вращения ротора суперкавитационного миксера

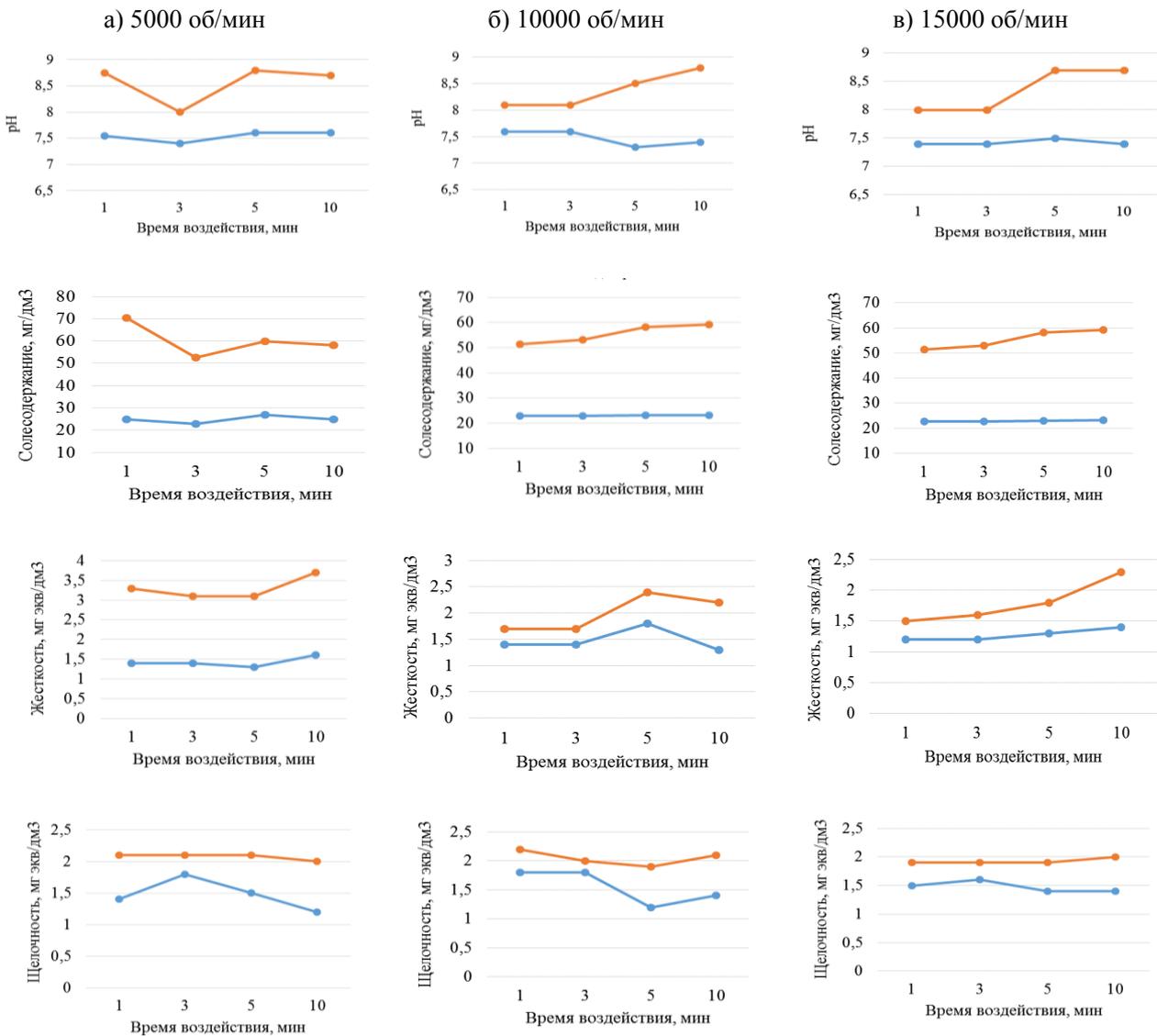


Рис. 1. Зависимости физико-химических параметров воды от времени кавитационной обработки: —●— кавитированная вода после разморозки; —●— кавитированная вода до заморозки

Fig. 1. Dependences of physical and chemical parameters of water on cavitation treatment time: —●— cavitated water after defrost; —●— cavitated water before freezing

Таблица 1. Результаты измерений

Table 1. Measurement results

№ пробы Sample no.	Обороты, тыс./мин Turnovers, ths/min	Время, мин. Time, min.	pH	УЭП (МАРК 603) УЕР (МАРК 603)	t, °C	№ пробы Sample no.	Обороты, тыс./мин Turnovers, ths/min	Время, мин. Time, min.	pH	УЭП (МАРК 603) УЕР (МАРК 603)	t, °C
1	15	1	8,7	114	30,5	7	15	5	9,4	116	27,5
2	10	1	8,1	121	24	8	10	5	9,4	125	25
3	5	1	8,2	131	22,5	9	5	5	8,7	128	24
4	15	3	9,1	134	29	10	15	10	10	152	28
5	10	3	9,3	130	24,5	11	10	10	10,2	129	25
6	5	3	9,3	111	23	12	5	10	9,3	133	24
солеcодержание – менее 1 гр/дм ³ щелочность – не менее 0,5 мг-экв/дм ³ жесткость – 0–4 мг-экв/дм ³						salt content – less than 1 g/dm ³ alkalinity – not less than 0.5 mg-eq/dm ³ hardness – 0–4 mg-eq/dm ³					

Таблица 2. Характеристика масел марки W30

Table 2. Characteristics of W30 oils

Образец (цветность) Sample (color)	Вязкость, ν (40 °C), мм ² /с Viscosity, ν (40°C), mm ² /s	Кислотное число, KOH/г Acid number, KOH/g	Температура застывания, °C Solidification temperature, °C	Плотность при 20 °C, кг/м ³ Density at 20°C, kg/m ³	Элементарный состав, мас. % Elemental composition, wt %				
					C	H	N	S	O
A	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Матричное масло (светло-желтое) Matrix oil (light yellow)	3,0250	9	-15,2	865	85,9	15,7	0,10	0,20	0,10
Отработанное масло (темно-коричневое) Used oil (dark brown)	3,2667	12	-11,9	905	87,4	11,2	0,31	0,41	2,65

Таблица 3. Значения вязкости тестируемых образцов

Table 3. Viscosity values of the tested samples

Номер пробы Sample no.	Время обра- ботки, с Processing time, s	Среднеарифметическая величина обработки, с Arithmetic mean value of processing, s	Постоянная вискози- метра, мм ² /с ² Viscometer constant, mm ² /s ²	Кинематическая вязкость, ν мм ² /с при t=23,8 °C Kinematic viscosity, ν mm ² /s at t=23,8 °C	Класс вязкости по ISO 3448 Viscosity class to ISO 3448
№ 1	31,33	31,17	0,09705	3,0250	3 (ν _{ср} =2,88–3,52 мм ² /с) (ν _{кр} =2,88–3,52 мм ² /с)
	31,30				
	30,87				
№ 2	33,79	33,66		3,2667	
	33,34				
	33,86				

Величина водородного показателя этих же образцов составила:

- проба № 1 pH=8,85;
- проба № 2 pH=9,71.

Коэффициент фильтрации масла K находится по формуле (2) по ГОСТ 19006-73:

$$K = \frac{t_2}{t_1}, \quad (2)$$

где t_1 – время фильтрации первых двух см³ масла; t_2 – время фильтрации последних двух см³ масла.

Начальные два см³ масла в первой пробе фильтровались в течение 15,19 с, последние – в течение 62,56 с, т. е. коэффициент фильтрации по формуле (2) равен 4,12. Для второй пробы:

$$K = \frac{485,62}{16,24} = 29,9.$$

Увеличение коэффициентов фильтрации в отработанном масле более чем в 7 раз свидетельствует о присутствии тяжелых загрязнителей, таких как смолистые вещества, механические примеси и пр.

Далее, отработанное масло пробы № 2 подвергли кавитационной обработке на двух типах установок: ультразвуковой и гидродинамической. Для дальнейшего исследования получили серии проб с результатами в зависимости от типа установки (табл. 4).

Таблица 4. Полученные результаты тестируемых образцов

Table 4. Obtained results of tested samples

Тип кавитационного воздействия Type of cavitation impact	Ультразвуковой Ultrasonic												Суперкавитационный Supercavitation											
	5			7			10			15			5		7		10		15					
Время, мин Time, min	5			7			10			15			5		7		10		15					
Время истечения, с Expiration time, s	43,73	44,04	44,18	48,54	47,84	48,10	48,59	48,94	49,09	49,07	48,66	48,92	46,09	47,37	47,61	48,61	47,01	48,27	49,51	47,93	49,45	49,66	48,07	49,79
t_{cp} , с (s)	43,98			48,16			48,87			48,88			47,02		47,96		48,96		49,17					
C , мм ² /с ² mm ² /s ²	0,09705																							
ν , мм ² /с (при $t=23,8$ °С) ν , mm ² /s (at $t=23,8$ °С)	4,2683			4,6730			4,7428			4,7438			4,5633		4,6545		4,7515		4,7719					
pH	8,20			7,92			7,80			7,63			8,21		8,06		7,70		7,47					
5 класс вязкости по ISO 3448 ($\nu_{cp}=4,14-5,06$ мм ² /с) Viscosity class 5 according to ISO 3448 ($\nu_{cp}=4.14-5.06$ mm ² /s)																								

Результаты исследования говорят о том, что процесс кавитации позволяет поднять класс вязкости отработанного масла с 3 до 5 (рис. 2), то есть оно становится гуще, плотнее, а следовательно, увеличиваются максимальные нагрузки, при которых масла сохраняют свои свойства. Графическое сравнение полученных результатов можно увидеть на рис. 2, 3.

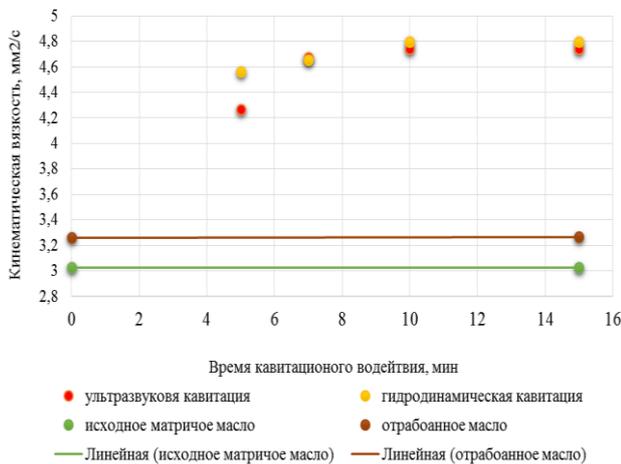


Рис. 2. Сравнение показателей вязкости масла – исходного, отработанного и после кавитационного воздействия

Fig. 2. Comparison of oil viscosity indicators – original, used and after cavitation exposure

Кроме того, величина водородного показателя проб, подвергшихся кавитации, находится в диапазоне 6–8 (рис. 3), что является оптимальным даже для исходных матричных масел. В отличие от проб

№ 1, 2, где в первом случае масло содержит присадки, а во втором закислен в процессе эксплуатации оборудования.

Полученные данные и наблюдения за фильтрацией проб № 1, 2 (табл. 3) дают понимание о наличии в отработанном масле осадка, содержащего минеральные примеси, свинец, продукты износа деталей оборудования и т. д. У отработанного масла после кавитационной обработки визуально наблюдается эффект выпадения осадка и присутствия запаха серы уже спустя 10 минут от начала воздействия.

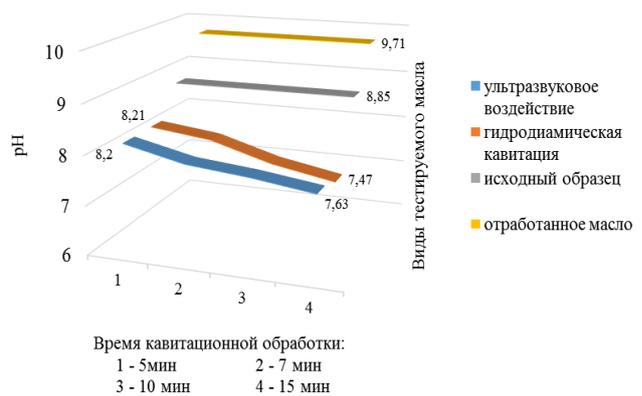


Рис. 3. Результаты определения величины водородного показателя pH

Fig. 3. Results of determining the pH value

Таким образом, получая повышенный класс вязкости по ISO 3448 восстановленного масла, и с учетом наличия осадка в тестируемом образце [18], было найдено оптимальное соотношение получае-

мого полезного продукта после кавитационной обработки: 70–80 % идет на повторное использование в хозяйственной деятельности, оставшаяся доля в количестве 20–30 % углеводородного осадка может быть отправлена на сжигание, при обязательном условии создания кавитационно обработанной ВТС с содержанием воды до 10–15 % [19].

Заключение

Эффективность утилизации отработанных масел и других нефтепродуктов в условиях Крайнего Севера может быть достигнута с учетом комплексного подхода за счет использования эффектов гидродинамического воздействия.

Полученные результаты дают право утверждать, что размороженная активированная вода сохраняет свои приобретенные физико-химические свойства. Перевод кавитационно обработанной воды в твердое агрегатное состояние делает возможным ее до-

ставку на удаленные расстояния. Ее естественное замерзание в районах с низкими температурами не будет носить фатального характера, и она может использоваться для создания водотопливных эмульсий на предприятиях, работающих на жидком топливе.

Комплексное потребление ресурсов – это результат наиболее полного, экономически и экологически оправданного использования всех полезных компонентов, содержащихся в сырье, а также в отходах производства [20]. Любые углеводородные отходы можно рассматривать в качестве вторичных материальных ресурсов, которые допустимо использовать в хозяйственных целях, частично или полностью замещая традиционные виды материально-сырьевых и топливно-энергетических ресурсов, главной ценностью которых является их постоянная воспроизводимость в производственном секторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крапивский Е.И. Нефтьшламы: уничтожение, утилизация, дезактивация: монография. – М.; Вологда: Инфра Инженерия, 2021. – 432 с.
2. Технологические аспекты экологически безопасной утилизации отработанных масел / О.П. Филиппова, С.З. Калаева, Э.С. Цховребов, Е.С. Сергеев // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. – 2023. – № 4 (20). – С. 91–96.
3. Chenavaz R.Y., Dimitrov S. From waste to wealth: policies to promote the circular economy // Journal of Cleaner Production. – 2024. – Vol. 443. – P. 1–11.
4. Кулагин В.А., Кулагина Л.В., Штым К.А. Перспективы развития кавитационных технологий: теория и практика // Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем. – Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. – С. 51–55.
5. Крыльшкин Р.Н., Гурина Р.В. Энергоэффективность термической утилизации нефтяных остатков // Енисейская теплофизика: Тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием. – Красноярск: СФУ, 2023. – С. 372–373.
6. Штриплинг Л.О. Переработка и утилизация нефтьшламов и нефтезагрязненных материалов, образующихся в местах добычи, транспортировки и переработки углеводородного сырья: монография / под ред. Н.А. Лившиц. – Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения Российской акад. наук, 2013. – 174 с.
7. Кулагина Т.А., Гурина Р.В. Высокотемпературное коксование как эффективная переработка нефтяных остатков // Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2022): Материалы XVIII Международной научно-технической конференции. В 2-х т. – Уфа: ФГБОУ ВО УГАТУ, 2022. – С. 131–134.
8. Кулагина Т.А., Хаглеев П.Е., Зайцева Е.Н. Обращение с промышленными и особо опасными отходами. – Красноярск: СФУ, 2021. – 512 с.
9. Szaja A., Montusiewicz A., Lebiocka M. Challenges of hydrodynamic cavitation of organic wastes // Applied sciences. – Lublin, Poland, 2022. DOI: 10.3390/app12157936
10. Degradation of pefloxacin by hybrid hydrodynamic cavitation with H₂O₂ and O₃ / B. Wang, H. Jiao, H. Su, T. Wang // Chemosphere. – 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135299
11. Economic and environmental benefits of using cavitation treated fuel in vehicles of internal combustion engines / I. Aftanaziv, M. Malovanyy, L. Shevchuk, O. Strogan, L. Strutynska // Communications – 2022. – Vol. 3 (24). – P. 158–169
12. Impact of hydrodynamic cavitation on the properties of coal-water fuel: an experimental study / O.P. Stebeleva, L.V. Kashkina, A.V. Minakov, O.A. Vshivkova // ACS Omega. – 2022. – Vol. 7. – P. 37369–37378.
13. Treatment of bio-refractory real effluent from polymer processing industry using cavitation-based hybrid treatment techniques / N.J. Lakshmi, P. Surabhi, P.R. Gogate, A.B. Pandit // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2023. – Vol. 12. – P. 1–20.
14. Effects of hybrid nanoparticle additives in n-butanol/waste plastic oil/diesel blends on combustion, particulate and gaseous emissions from diesel engine evaluated with entropy-weighted PROMETHEE II and TOPSIS: environmental and health risks of plastic waste / A.A. Yusuf, J.D. Ampah, M.E.M. Soudagar, I. Veza, U. Kingsley, S. Afrane, C. Jin, H. Liu // Energy Conversion and Management. – 2022. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115758
15. Современное состояние использования кавитационных технологий (краткий обзор) / А.Ю. Радзюк, Е.Б. Истягина, Л.В. Кулагина, А.В. Жуйков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 209–218. DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3623
16. Ekaterinchev A.V., Baranova M.P. Significance of physical and chemical processes in energy technologies // 21 century: fundamental science and technology. Proceedings of XXX international scientific-practical conference. – Bengaluru, Karnataka, India, 2022. – P. 88–91.

17. Insight into the sludge reduction performances by hydrodynamic cavitation / Y. Yao, Y. Sun, X. Wang, Y. Song, Z. Wang // *Journal of Water Process Engineering*. – 2022. – Vol. 49 – P. 1–8.
18. Гульков А.Н., Сухова Т.Н., Осипова Е.Б. Модельное исследование кавитации в вязких средах на примере нефти // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2013. – № S3. – С. 46–52.
19. Кулагина Т.А. Разработка режимов сжигания обводненных топочных мазутов и водотопливных эмульсий: дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2000. – 178 с.
20. Гурина Р.В. Утилизация накопленных и образующихся отходов нефтяной промышленности // *Экология и безопасность жизнедеятельности: Сборник статей XVIII Международной научно-практической конференции*. – Пенза: ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ, 2018. – С. 127–131.

Информация об авторах

Татьяна Анатольевна Кулагина, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой техносферной и экологической безопасности Политехнического института Сибирского федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Борисова, 5. tak.sfu@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2601-9570>

Ольга Геннадьевна Дубровская, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерных систем зданий и сооружений Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82, стр. 1. dubrovskayaolga@mail.ru

Елена Николаевна Зайцева, старший преподаватель кафедры техносферной и экологической безопасности Политехнического института Сибирского федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Борисова, 5. Lenap1978@mail.ru

Роман Николаевич Крылышкин, аспирант кафедры техносферной и экологической безопасности Политехнического института Сибирского федерального университета, Россия, 660074 г. Красноярск, ул. Борисова, 5. roma@z-gorod.ru

Поступила в редакцию: 06.03.2024

Поступила после рецензирования: 24.04.2024

Принята к публикации: 26.04.2024

REFERENCES

1. Krapivsky E.I. *Oil sludge: destruction, utilization, decontamination: monograph*. Moscow, Infra Engineering Publ., 2021. 432 p. (In Russ.)
2. Filippova O.P., Kalaeva S.Z., Tskhovrebov E.S., Sergeev E.S. Technological aspects of environmentally safe utilization of used oils. *Vestnik of Tver State Technical University. Series: Construction. Electrical engineering and chemical technologies*, 2023, vol. 4 (20), pp. 91–96. (In Russ.)
3. Chenavaz R.Y., Dimitrov S. From waste to wealth: policies to promote the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 2024, vol. 443, pp. 1–11.
4. Kulagin V.A., Kulagina L.V., Shtym K.A. Prospects of cavitation technologies development: theory and practice. *Safety and monitoring of natural and technogenic systems*. Novosibirsk, FIC IVT Publ., 2023. pp. 51–55. (In Russ.)
5. Krylyshkin R.N., Gurina R.V. Energy efficiency of the thermal utilization of the oil residues. *Yenisei thermophys. Theses of reports of the I All-Russian scientific conference with international participation*. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2023. pp. 372–373. (In Russ.)
6. Shtripling L.O., Tokarev V.V., Gerzhberg Y.M., Kraus Y.A., Logunova Y.V. *Processing and utilization of oil sludge and oil-contaminated materials formed in places of extraction, transportation and processing of hydrocarbon raw materials: monograph*. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2013. 174 p. (In Russ.)
7. Kulagina T.A., Gurina R.V. High-temperature coking as an effective processing of oil residues. *Science, education, production in solving environmental problems (Ecology-2022). Materials of XVIII International Scientific and Technical Conference*. Ufa, FGBOU VO UGATU Publ., 2022. Vol. 2, pp 131–134. (In Russ.)
8. Kulagina T.A., Khagleyev P.E., Zaitseva E.N. *Handling of industrial and highly hazardous wastes*. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2021. 512 p. (In Russ.)
9. Szaja A., Montusiewicz A., Lebiocka M. Challenges of hydrodynamic cavitation of organic wastes. *Applied sciences*. Lublin, Poland, 2022. DOI: 10.3390/app12157936
10. Wang B., Jiao H., Su H., Wang T. Degradation of pefloxacin by hybrid hydrodynamic cavitation with H₂O₂ and O₃. *Chemosphere*, 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135299
11. Aftanaziv I., Malovanyy M., Shevchuk L., Strogan O., Strutynska L. Economic and environmental benefits of using cavitation treated fuel in vehicles of internal combustion engines. *Communications*, 2022, vol. 3 (24), pp. 158–169.
12. Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Minakov A.V., Vshivkova O.A. Impact of hydrodynamic cavitation on the properties of coal-water fuel: an experimental study. *ACS Omega*, 2022, vol. 7, pp. 37369–37378.
13. Lakshmi N.J., Surabhi P., Gogate P.R., Pandit A.B. Treatment of bio-refractory real effluent from polymer processing industry using cavitation-based hybrid treatment techniques. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, vol. 12, pp. 1–20.
14. Yusuf A.A., Ampah J.D., Soudagar M.E., Veza I., Kingsley U., Afrane S., Jin C., Liu H. Effects of hybrid nanoparticle additives in n-butanol/waste plastic oil/diesel blends on combustion, particulate and gaseous emissions from diesel engine evaluated with

- entropy-weighted PROMETHEE II and TOPSIS: environmental and health risks of plastic waste. *Energy Conversion and Management*, 2022. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115758
15. Radziuk A.Yu., Istiagina E.B., Kulagina L.V., Zhuikov A.V. Current state of cavitation technology use (brief review). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 209–218. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3623
 16. Ekaterinchev A.V., Baranova M.P. Significance of physical and chemical processes in energy technologies. *21 century: fundamental science and technology. Proceedings of XXX international scientific-practical conference*. Bengaluru, Karnataka, India, 2022. pp. 88–91.
 17. Yao Y., Sun Y., Wang X., Song Y., Wang Z. Insight into the sludge reduction performances by hydrodynamic cavitation. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, vol. 49, pp. 1–8.
 18. Gulkov A.N., Sukhova T.N., Osipova E.B. Model study of cavitation in viscous media by the example of oil. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2013, vol. S3, pp. 46–52. (In Russ.)
 19. Kulagina T.A. *Development of modes of combustion of watered furnace fuel oils and water-fuel emulsions*. Cand. Diss. Krasnoyarsk, 2000. 178 p. (In Russ.)
 20. Gurina R.V. Utilization of accumulated and generated wastes of oil industry. *Ecology and Life Safety. Collection of articles of the XVIII International Scientific and Practical Conference*. Penza, FGBOU VO Penza GAU Publ., 2018. pp. 127–131. (In Russ.)

Information about the authors

Tatiana A. Kulagina, Dr. Sc., Professor, Head of the Technosphere and Environmental Safety Department, Siberian Federal University, 5, Borisiv street, Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation. tak.sfu@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2601-9570>

Olga G. Dubrovskaya, Cand. Sc., Associate Professor, Siberian Federal University, 82/1, Svobodniy avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. dubrovskayaolga@mail.ru

Elena N. Zaytseva, Senior Lecturer, Siberian Federal University, 5, Borisiv street, Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation. Lenap1978@mail.ru

Roman N. Krylyshkin, Postgraduate Student, Siberian Federal University, 5, Borisiv street, Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation. roma@z-gorod.ru

Received: 06.03.2024

Revised: 24.04.2024

Accepted: 26.04.2024