

ЗАМКНУТЫЙ ЦИКЛ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ МАСЕЛ НА ЦИРКУМПОЛЯРНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Т. А. Кулагина, Е. Н. Зайцева

*ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»,
Красноярск, Россия*

Ключевые слова: кавитационное воздействие; окружающая природная среда; отработанные масла; северные территории; утилизация.

Аннотация: Разработана технология утилизации накопленных на циркумполярных территориях и получаемых в технологических процессах отходов от использования промышленных масел. Предложенный вариант кавитационной обработки отработанного масла дает возможность восстанавливать исходные свойства нефтепродуктов и применять их по прямому назначению на предприятиях без перевозки на большие расстояния для восстановления, что соответствует требованиям природоохранного законодательства даже при отсутствии специализированных предприятий, тем самым минимизируя нагрузку на природную среду.

Введение

Большая часть территории России расположена в северных широтах с продолжительной зимой, мерзлыми грунтами, неразветвленной структурой автомобильных дорог, отсутствием железнодорожного сообщения и низкой плотностью проживающего населения. Предприятия, осуществляющие свою деятельность в суровых климатических зонах, как правило, занимаются добычей полезных ископаемых и всеми сопутствующими технологическими операциями: обогащением, транспортировкой, хранением, перевалкой и пр. При этом используется огромное количество смазочных материалов, которые получают в большей степени при переработке сырой нефти.

Вовлеченные в производственные процессы промышленные масла, исполнив свою функцию, переходят в категорию отходов высокого класса опасности, имеющих значимую энергетическую составляющую и в то же

Кулагина Татьяна Анатольевна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой техносферной и экологической безопасности; Зайцева Елена Николаевна – старший преподаватель кафедры техносферной и экологической безопасности, e-mail: lenap1978@mail.ru, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, Россия.

время насыщенных сложными продуктами, полученными при работе технологического оборудования.

В развитых индустриальных центрах РФ, в отличие от удаленных районов, имеются возможности для утилизации отработанных масел и возврата их в хозяйственную деятельность. В зависимости от используемого процесса регенерации можно изготовить две-три фракции базовых масел, из которых путем компаундирования с введением присадок получают востребованные товарные продукты. Технология очистки, как правило, включает несколько этапов:

- механический (удаление воды и твердых частиц – отстаивание, фильтрация, сепарация),
- теплофизический (выпаривание, крекинг),
- физико-химический (адсорбция, коагуляция, обезвоживание),
- химический (гидрогенизация, селективная очистка, пиролиз).

Например, в ФРГ, занимающей лидирующее место в Европе по очистке отработанных масел, в оборот включено около 55 % от всего объема использованных масел. В соответствии с законодательством Германии, производители индустриальных масел обязаны добавлять в конечный продукт не менее 10 % так называемого восстановленного масла (refining base oil) [1, 2]. В Италии на базе созданной ассоциации предприятий (Национальная ассоциация отработанных минеральных масел – А.Н.С.О.М.Е.) функционируют шесть установок регенерации отработанных масел общей производительностью более 200 тыс. т в год, а 18 % собранных масел поступает на сжигание в качестве топлива [3]. В Бельгии с 2000 годов регенерируются 75 % собранных масел, во Франции на установке производительностью 110 тыс. т в год, из восстановленного количества 28 % масел приобретают исходные свойства, а 54 % идут на сжигание в качестве топлива [4, 5].

В России действуют требования, при которых использованные масла рассматривают как расширенную ответственность производителя и их переработкой должны заниматься только компании из реестра утилизаторов (ЕФГИС УОИТ). Мощности переработки на современном этапе составляют более 60 тыс. т отработанного масла в год, с перспективой роста в ближайшее время до 100 тыс. т и охватом все большего числа российских регионов [6, 7].

Однако часто в целях снижения затрат на организацию мест временного и раздельного накопления использованных масел, их транспортировки к местам переработки природопользователи намеренно занижают количество этих отходов. Таким образом, реальные объемы отработанных масел могут превышать заявленные в десятки раз. Эти неучтенные потери сливают, в лучшем случае, в крупнотоннажную тару и подвергают несанкционированному хранению, в худшем – сжигают в нарушении действующего запрета [8] с образованием высокотоксичных газообразных загрязняющих веществ, таких как диоксины.

Нередко отработанное масло сливают на почву, в водоемы, нанося непоправимый урон окружающей среде, так как даже в южных регионах процесс самовосстановления от подобных загрязнений может растягиваться на 10 – 15 и более лет. На Севере естественные процессы самоочи-

щения затруднены, поэтому, попав на тонкий слой почвы, нефтепродукты практически не подвергаются деструкции или она заметно замедляется из-за близкого залегания многолетних мерзлых грунтов, низкой активности микробных популяций [9].

Ежегодное потребление масел в России составляет около 2 млн т. При этом собирается лишь их четвертая часть при установленных ориентировочных нормах сбора – 50 % от используемых [10].

Оптимальный метод утилизации должен сочетать в себе следующие результаты [11]:

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

Для обеспечения наиболее качественного восстановления отработанного масла [12] сбор необходимо осуществлять в герметичных закрытых емкостях с нанесенными на таре маркировочными знаками; в случае хранения на уличной площадке, емкости должны быть защищены от действия прямых солнечных лучей и атмосферных осадков и т.д.

Утилизация отработанного масла – отличный пример экономики замкнутого цикла в действии, когда в конце срока службы «отработка» собирается и восстанавливается на специализированных предприятиях. Правильно выстроенная работа по возврату отработанных масел в хозяйственную деятельность является актуальной, более того, рентабельной и наукоемкой областью, так как при правильной организации процесса регенерации существуют очевидные преимущества:

- 1) ресурсосбережение за счет использования нефти;
- 2) для получения матричного масла из отработки требуется на 50 – 80 % меньше электроэнергии, чем для переработки сырой нефти [13];
- 3) углеродный след от масел, полученных путем повторной очистки, значительно меньше, чем получаемых из сырой нефти [14];
- 4) выход масла из переработанного значительно больше, чем при его первичном получении из сырой нефти (из 100 т нефти получают 10 т моторного масла, а при переработке 100 т отработки можно получить до 80 т уже готового к употреблению продукта) [15].

Материалы и методы

Технология восстановления масел, как правило, двухступенчатая: во-первых, удаляются вода, механические примеси, затем методом коагуляции продукты окисления отработанных присадок; во-вторых, с использованием вакуумной колонны ректификации уже получают товарные масляные фракции.

Однако какой бы способ восстановления отработанных масел не применялся, при любой технологии остаются отходы, зачастую трудно утили-

зируемые и экологически опасные. В качестве альтернативного варианта утилизации предложена двухступенчатая кавитационная обработка использованного масла, при которой на первом этапе воздействия возможно получение до 70 % восстановленного продукта (масла), а на втором – используя остаточный углеводородный осадок, получают водомасляное топливо [16]. Данный способ позволяет минимизировать воздействие на окружающую среду, так как отработанное масло утилизируется полностью.

Кроме того, удаленность северных территорий – это необходимость вывоза использованных масел для их утилизации. Поэтому актуальным является утилизация отработанных масел в местах их образования.

Серии экспериментов проводились на исходном матричном масле, отработанном и отработанным с кавитационным воздействием. В лаборатории определяли следующие показатели: температуру, класс вязкости, величину водородного показателя с использованием термометра лабораторного ТЛ-4, рН-метра/иономера ИТАН, вискозиметра ВПЖТ-1.

Экспериментальные исследования кавитационной технологии проводились на лабораторной кавитационной СК-установке Silverson L5 [12]. Ранее доказано, что данный способ воздействия на жидкую среду (воду), способствует ее активации, изменяет свойства и интенсифицирует физико-химические процессы [17, 18].

Цель работы – исследование процесса гидродинамического воздействия непосредственно на отработанные индустриальные масла для подбора определенных режимов кавитационной обработки.

Результаты и обсуждения

Анализ результатов выполненных исследований показал, что процесс кавитации позволил повысить класс вязкости отработанного масла с 3 до 5, то есть оно стало гуще, плотнее, и, следовательно, сможет сохранять свои свойства при работе в сильно нагруженных механизмах даже на малых скоростях (табл. 1).

Кроме того, величина водородного показателя проб масел, подвергшихся кавитационной обработке при разных скоростях вращения ротора, находилась в диапазоне 7,0...8,5, что является хорошим результатом. Для матричных масел рН соответствует 8,5 и более из-за присутствия специальных присадок, а для отработанного – 9,7, так как масло закислено в процессе эксплуатации оборудования (рис. 1).

Результаты экспериментальных исследований и математического моделирования на основании матриц изменения концентрации нефтепродуктов в активной фазе в зависимости от скорости вращения кавитационной крыльчатки, времени обработки и рН среды показаны на рис. 2. Полученные данные позволяют выбирать оптимальный режим кавитационной обработки для поиска максимального выхода восстановленного масла из отработки. Концентрация анализируемого в эксперименте отработанного масла нефтепродукта со значением 1,45 соответствует переходу 68,9 % отработанного масла в активную, восстановленную фазу при скорости вращения 10 тыс. об./мин и времени воздействия 10 мин.

Таблица 1

Определение класса вязкости масел

Тип масла		Время истечения t , с	Средняя величина времени истечения t_{cp} , с	Кинематическая вязкость ν , мм ² /с (при $t = 23,8$ °С)	Класс вязкости по ISO 3448
Матричное		31,31	31,17	3,0250	3 (при $\nu = 2,88... 3,52$ мм ² /с)
		31,30			
		30,89			
Отработанное		33,75	33,66	3,2667	
		33,37			
		33,87			
Кавитированное	5 мин	46,22	47,02	4,5633	5 (при $\nu = 4,14... 5,06$ мм ² /с)
		47,35			
		47,50			
	7 мин	48,51	47,96	4,6545	
		47,11			
		48,27			
	10 мин	49,26	48,96	4,7515	
		48,18			
		49,45			
	15 мин	49,56	49,17	4,7719	
		48,19			
		49,77			

Постоянная вискозиметра – 0,09705 мм²/с².

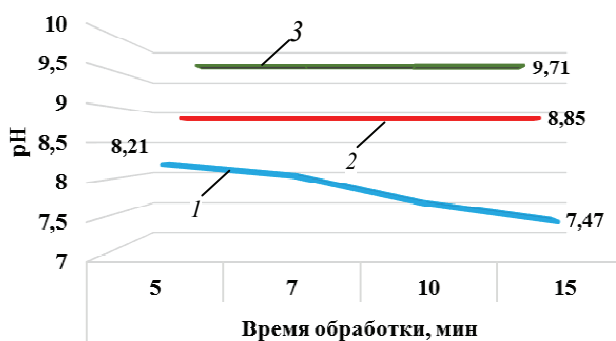


Рис. 1. Результаты определения величины водородного показателя проб масел:

1 – отработанное масло, после гидродинамической кавитации;
2 – матричное; 3 – отработанное

Заключение

Утилизация отработанных масел в циркумполярных территориях России сопряжена с решением ряда эколого-экономических задач и требует дифференцированного подхода к проблеме. Предложенный вариант кавитационной обработки отработанного масла дает возможность восстанавливать исходные свойства масел и применять их по прямому назначению на предприятиях без перевозки на большие расстояния для восстановления, что соответствует требованиям природоохранного законодательства.

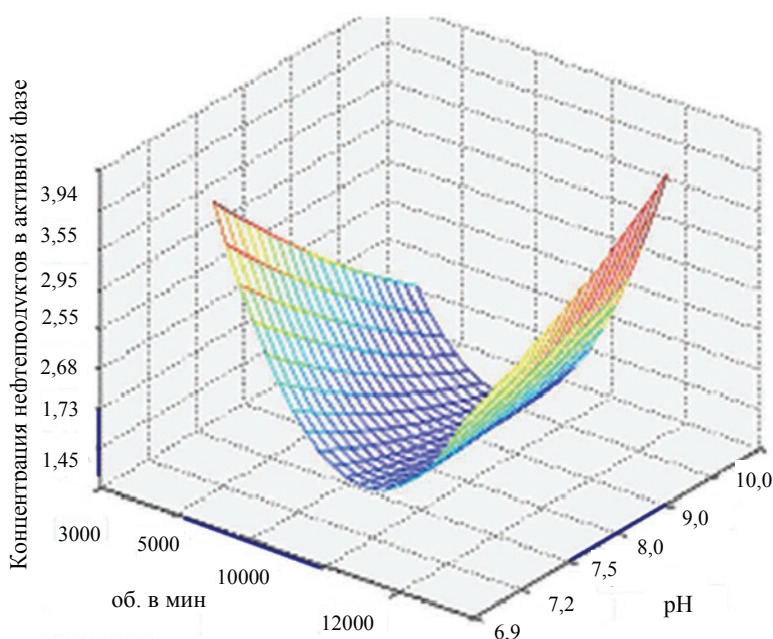


Рис. 2. Регулировочная диаграмма процесса восстановления отработанного масла, методом кавитационной обработки

В целом же использование кавитационных технологий позволяет осуществить полный цикл утилизации отработанных масел даже при отсутствии специализированных предприятий, тем самым минимизировав нагрузку на природную среду.

Список литературы

1. Саая, К. С. Автомобильные масла как вторичное сырье / К. С. Саая // Научные труды тувинского государственного университета : материалы ежегодной науч.-практ. конф. преподавателей, сотрудников и аспирантов ТувГУ, посвященной Году экологии в Российской Федерации и Году молодежных инициатив в Туве (Кызыл, 21 октября 2017 г.). Т. XVI. – Кызыл, 2017. – С. 140 – 141.
2. Разина, Г. Н. Плазмохимическая переработка отработанных смазочных материалов в свете правительственного проекта положения «О порядке организации деятельности по сбору и переработки отработанных смазочных материалов, масел и жидкостей» / Г. Н. Разина, О. О. Цеков, Н. С. Ушин // Успехи в химии и химической технологии. – 2014. – Т. 28, № 4. – С. 71 – 75.
3. Маколова, Л. В. Проблема формирования механизма эффективного использования ресурсов агропромышленного комплекса на основе внедрения опыта эффективного природопользования стран ЕС / Л. В. Маколова // Актуальные вопросы экономических наук. – 2013. – № 29-1. – С. 171 – 179.
4. Исмаков, Р. А. Вторичное применение смазочных материалов в бурении скважин / Р. А. Исмаков, Р. А. Валитов // Новые технологии в переработке и утилизации отработанных масел и смазочных материалов (Москва, 26 – 28 ноября 2003 г.). – М., 2003. – С. 121–122.
5. Маколова, Л. В. Экологические предпосылки необходимости восстановления и повторного использования отработанных автотракторных масел / Л. В. Маколова // TERRA ECONOMICUS. – 2011. – Т. 9, № 3, Ч. 3. – С. 60 – 63.

6. ООО «РОСА-1» : офиц. сайт. – URL: <https://www.rosal.ru/> (дата обращения : 09.01.2025).
7. ООО «Этиламин-Ек» : офиц. сайт. – URL: <https://etilamin-ek.ru/> (дата обращения : 09.01.2025).
8. ТР ТС 030/2012 «О требованиях к смазочным материалам, маслам и специальным жидкостям» : принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 20 июля 2012 года № 59. – Текст : электронный // ГАРАНТ.РУ. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70104564/> (дата обращения: 09.01.2025).
9. Телеснина, В. М. Проблемы устойчивости арктических почв и биоремедиации нефтезагрязнений / В. М. Телеснина, М. А. Жуков // Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. – 2021. – № 1(5). – С. 48 – 53.
10. Обращение с отходами нефтепродуктов : монография / Т. А. Кулагина, Е. Н. Зайцева, В. А. Кулагин, Л. В. Кулагина, О. Г. Дубровская, Э. Э. Кобылов. – М. : РУСАЙНС, 2024. – 242 с.
11. ГОСТ Р 56828.42–2018. Утилизация отработанных масел. Показатели для идентификации. – Введ. 01.01.2019. – М. : Стандартинформ, 2018. – 8 с.
12. 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
13. Ядыкин, А. В. Мембранная очистка отработанного моторного масла / А. В. Ядыкин // Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник». – 2022. – № 5. – С. 3086 – 3092.
14. Дмитриевский, А. Н. Цифровая модернизация нефтегазового производства в условиях снижения углеродного следа / А. Н. Дмитриевский, Н. А. Еремин, И. К. Басниева // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2022. – Вып. 1. – С. 467 – 476.
15. Очистка отработанных моторных масел от микронных и субмикронных частиц в сверхцентрифуге / А. Е. Новиков, А. Б. Голованчиков, М. И. Филимонов, Д. А. Баранов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2019. – № 1(53). – С. 264 – 274.
16. Кулагина, Т. А. Эффективность подготовительных процессов сжигания водотопливных смесей в топках малого объема : дис. ... д-ра техн. наук. – Омск, 2009. – 340 с.
17. Кулагин, В. А. Гидродинамические воздействия на жидкости, золи, смеси твердые границы потоков / В. А. Кулагин // Вестник КГТУ. Проблемы развития теплоэнергетики и пути их решения : пр. науч.-практ. конф. КГТУ. – Красноярск, 1997. – Вып. 8. – С. 26 – 43.
18. Утилизация отработанных нефтепродуктов и кондиционирование промышленных стоков на базе кавитационной технологии в условиях циркумпольярных территорий / Т. А. Кулагина, Е. Н. Зайцева, О. Г. Дубровская, Л. В. Кулагина. // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2024. – Т. 17, № 4. – С. 414 – 428.

References

1. Saaya K.S. *Nauchnyye trudy tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta: materialy yezhegodnoy nauch.-prakt. konf. prepodavateley, sotrudnikov i aspirantov TuvGU, posvyashchennoy Godu ekologii v Rossiyskoy Federatsii i Godu molodezhnykh initsiativ v Tuve* [Scientific papers of Tuva State University: proceedings of the annual scientific and practical conference of TuvSU faculty, staff and graduate students dedicated to the Year of Ecology in the Russian Federation and the Year of Youth Initiatives in Tuva] (Kyzyl, October 21, 2017), vol. XVI, Kyzyl, 2017, pp. 140-141. (In Russ.)

2. Razina G.N., Tsekov O.O., Ushin N.S. [Plasma chemical processing of used lubricants in the light of the government draft regulation "On the organization of activities for the collection and processing of used lubricants, oils and liquids"], *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in Chemistry and chemical technology], 2014, vol. 28, no. 4, pp. 71-75. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Mokolova L.V. [The problem of forming a mechanism for the effective use of agro-industrial complex resources based on the implementation of the experience of effective environmental management in the EU], *Aktual'nyye voprosy ekonomicheskikh nauk* [Actual Issues of Economic Sciences], 2013, no. 29-1, pp. 171-179. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Ismakov R.A., Valitov R.A. [Secondary use of lubricants in drilling wells], *Novyye tekhnologii v pererabotke i utilizatsii otrabotannykh masel i smazochnykh materialov* [New technologies in the processing and disposal of used oils and lubricants], (Moscow, November 26-28, 2003), Moscow, 2003, pp. 121-122. (In Russ.)
5. Makolova L.V. [Ecological prerequisites for the need to restore and reuse used automotive oils], *TERRA ECONOMICUS*, 2011, vol. 9, no. 3, part 3, pp. 60-63. (In Russ., abstract in Eng.)
6. available at: <https://www.rosal.ru/> (accessed 09 January 2025).
7. available at: <https://etilamin-ek.ru/> (accessed 09 January 2025).
8. available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70104564/> (accessed 09 January 2025).
9. Telesnina V.M., Zhukov M.A. [Problems of sustainability Arctic soils and oil-contaminated bioremediation], *Arktika 2035: aktu-al'nyye voprosy, problemy, resheniya* [Arctic 2035: current issues, problems, solutions], 2021, no. 1(5), pp. 48-53. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Kulagina T.A., Zaitseva E.N., Kulagin V.A., Kulagina L.V., Dubrovskaya O.G., Kobilov E.E. *Obrashcheniye s otkhodami nefteproduktov: monografiya* [Waste management of petroleum products: monograph], Moscow: RUSAINS, 2024, 242 p. (In Russ.)
11. GOST R 56828.42-2018. *Utilizatsiya otrabotannykh masel. Pokazateli dlya identifikatsii* [Utilization of used oils. Indicators for identification], Moscow: Standartinform, 2018, 8 p. (In Russ.)
12. Kulagina T.A., Dubrovskaya O.G., Zaitseva E.N., Krylyshkin R.N. [Improvement of technologies for waste disposal of petroleum products], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering], 2024, vol. 335, no. 6, pp. 46-54. doi: 10.18799/24131830/2024/6/4607 (In Russ., abstract in Eng.)
13. Yadykin A.V. [Membrane purification of used engine oil], *Nauchnyy setevoj zhurnal "Stolypinskiy vestnik"* [Scientific online journal Stolypinsky Bulletin], 2022, no. 5, pp. 3086-3092. (In Russ., abstract in Eng.)
14. Dmitrievsky A.N., Eremin N.A., Basnieva I.K. [Digital modernization of oil and gas production in conditions of reducing the carbon footprint], *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle* [Izvestiya TulSU. Geosciences], 2022, no. 1, pp. 467-476. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Novikov A.E., Golovanchikov A.B., Filimonov M.I., Baranov D.A. [Purification of spent engine oils from micron and submicron particles in a supercentrifuge], *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshneye professional'noye obrazovaniye* [News of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education], 2019, no. 1(53), pp. 264-274. (In Russ., abstract in Eng.)
16. Kulagina T.A. *PhD Dissertation (Engineering)*, Omsk, 2009, 340 p. (In Russ.)

17. Kulagin V.A. [Hydrodynamic effects on liquids, sols, and mixtures of solid flow boundaries], *Vestnik KGTU. Problemy razvitiya teploenergetiki i puti ikh resheniya : nr. nauch.-prakt. konf. KGTU* [Bulletin of KSTU. Problems of thermal power engineering development and ways to solve them: tr. scientific and practical conference of KSTU], Krasnoyarsk, 1997, vol. 8, pp. 26-43. (In Russ.)

18. Kulagina T.A., Zaitseva E.N., Dubrovskaya O.G., Kulagina L.V. [Utilization of spent petroleum products and conditioning of industrial effluents based on cavitation technology in circumpolar territories], *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of Siberian Federal University. Machinery and technology], 2024, vol. 17, no. 4, pp. 414-428. (In Russ., abstract in Eng.)

Closed Cycle of Industrial Oil Use in Circumpolar Territories

T. A. Kulagina, E. N. Zaitseva

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Keywords: used oils; recycling; cavitation effects; natural environment; northern territories.

Abstract: Waste oils, being one of the hazardous wastes, are formed in almost all types of human activities. Waste oil disposal is a complex and often expensive process, which highlights the need to find simpler, safer, cost – effective and waste-free methods. Cavitation treatment of used oils helps to change their physico-chemical properties and allows obtaining valuable end products for economic activities with minimal impact on the natural environment.

© Т. А. Кулагина, Е. Н. Зайцева, 2025