

ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ МАСЕЛ

Маркелов А.В.

Маркелов Александр Владимирович

Ивановский государственный политехнический университет,

г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 21.

Ярославский государственный технический университет,

г. Ярославль, Россия. 150023, Ярославская область, г. Ярославль, Московский проспект, д. 88.

E-mail: aleksandr203.37@mail.ru

В статье представлены результаты научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по совершенствованию аппаратурного оформления процессов баромембранного разделения вязких гетерогенных систем, к которым относятся отработанные технические масла и масляные эмульсии. Экспериментальные исследования проводились на модельных пробах отработанных масел различной природы. Были использованы различные типы мембран и фильтров, чтобы установить, какие конфигурации обеспечивают наилучшую эффективность очистки. Также был изучен влияние различных параметров, таких как скорость фильтрации и концентрация загрязнений, на эффективность процесса ультрафильтрации. В целом, данное обобщение результатов исследований процессов ультрафильтрации для регенерации отработанных технических масел представляет ценную информацию для инженеров и специалистов, работающих в области утилизации отработанных масел. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процессов ультрафильтрации и повышения эффективности регенерации масел, что является значимым вкладом в развитие экологических и энергосберегающих технологий.

Ключевые слова: отработанные технические масла, ультрафильтрация, регенерация, мембраны, эффективность процесса, качество продуктов разделения

GENERALIZATION OF THE RESULTS OF STUDIES OF ULTRAFILTRATION PROCESSES FOR THE REGENERATION OF USED TECHNICAL OILS

Markelov A.V.

Markelov Alexander Vladimirovich

Ivanovo State Polytechnic University,

Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave, 21.

Yaroslavl State Technical University,

Yaroslavl, Russia. 150023, Yaroslavl region, Yaroslavl, Moskovsky prospect, 88.

E-mail: aleksandr203.37@mail.ru

The article presents the results of research and development work to improve the hardware design of the processes of baromembrane separation of viscous heterogeneous systems, which include used technical oils and oil emulsions. Experimental studies were carried out on model samples of used oils of various natures. Various types of membranes and filters were used to determine which configurations provided the best cleaning efficiency. The influence of various parameters, such as filtration rate and contamination concentration, on the efficiency of the ultrafiltration process was also studied. In general, this summary of the results of studies of ultrafiltration processes for the regeneration of used technical oils provides valuable information for engineers and specialists working in the field of waste oil utilization. The results obtained can be used to optimize ultrafiltration processes and increase the efficiency of oil regeneration, which is a significant contribution to the development of environmental and energy-saving technologies.

Keywords: used technical oils, ultrafiltration, regeneration, membranes, process efficiency, quality of separation products

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Актуальность проблемы исследования процессов регенерации отработанных технических масел (ОТМ) методом ультрафильтрации обусловлена несколькими факторами.

Во-первых, современное общество сталкивается с проблемой утилизации и переработки отработанных технических масел, таких как моторные, трансмиссионные и промышленные масла. Отработанные моторные масла относятся к самым распространенным видам отходов подвижного состава автотранспорта, строительных и дорожных машин [1]. Российский рынок отработанных масел самый большой в Европе и составляет порядка 2,5 млн. тонн в год [1]. По статистике Федеральной службы по надзору в сфере природопользования официально утилизируется около 40 %, а глубокой переработке подвергается лишь 5 – 15 % [1]. Отработанные масла содержат вредные вещества, такие как тяжелые металлы, фенолы, полициклические ароматические углеводороды и другие загрязнители, которые могут нанести значительный вред окружающей среде при неправильной утилизации или выбросе [2].

Во-вторых, ультрафильтрация является одним из наиболее эффективных процессов очистки и регенерации отработанных масел. Она позволяет удалить мельчайшие частицы, взвешенные вещества и загрязнители, применяя мембранные фильтры определенного порядка фильтрации. Однако, для эффективного использования метода ультрафильтрации необходимо провести исследование, которые позволят обобщить и систематизировать полученные результаты, определить оптимальные условия процесса и разработать рекомендации для промышленных предприятий [3-5].

В-третьих, разработка новых методов и технологий ультрафильтрации для регенерации отработанных масел может привести к значительному экономическому и экологическому эффекту. Утилизация отработанных масел, которые можно отнести к вязким гетерогенным системам (ВГС), часто требует значительных затрат, в то время как их регенерация позволит повторно использовать эти масла в производственных процессах, что снизит расходы на приобретение новых масел и сократит негативное воздействие на окружающую среду [6, 7].

Таким образом, обобщение результатов исследований процессов ультрафильтрации для регенерации отработанных технических масел является актуальной проблемой с точки зрения экологической безопасности, эффективности и экономической выгоды.

Основная цель данной работы - обобщение результатов исследований процессов ультрафильтрации при регенерации отработанных технических масел. Это позволит сформулировать эффективные рекомендации и принципы для оптимального применения ультрафильтрации в процессе регенерации масел.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для применения данной технологии очистки потребовалось пересмотреть подходы к методологии исследования баромембранных процессов с разработкой нескольких новых математических моделей. Процесс ультрафильтрации ВГС характеризуется сложным комплексом физико-химических явлений. Поэтому данный процесс рассматривался как сложная физико-химическая система (ФХС), основываясь на системном анализе [8] и декомпозиции общей картины проведения процесса разделения ВГС, что позволяет полноценно и всесторонне провести его исследование, учитывая взаимосвязь всех компонентов системы, и таким образом, повысить достоверность результатов исследования, а также оценить его эффективность, снизить энергозатраты, минимизировать затраты на обслуживание оборудования, повысить качество фильтрата и производительность аппаратов по разделению вязких жидкостей.

На основе предложенной методологии исследования баромембранных процессов разработан метод расчета массопереноса через полупроницаемую перегородку в условиях переменных физических свойств и гидродинамических параметров взаимодействующих фаз, базирующихся на следующих впервые полученных решениях краевых задач:

а) массопереноса в условиях нестационарности перепада давления, величина которого распределена по координате по произвольному закону, учитывающая физические свойства среды и технические характеристики мембранного элемента [9];

б) массообмена в условиях нестационарности, обусловленной изменяющейся толщиной гелевой поляризации [10];

в) разработано математическое описание процесса образования осадка на поверхности разделения ультрафильтрационной мембраны, позволяющая определять значения коэффициентов массоотдачи и интенсивности осаждения коллоидных частиц из ядра потока к поверхности мембраны при турбулентном режиме течения потока в широком диапазоне числа Шмидта для рассматриваемых систем на основе адаптации теории турбулентного переноса и осаждения аэрозоль [11].

Кроме этого, был разработан ряд инновационных решений, в основном связанных с наличием в отработанных маслах компонентов, отрицательно влияющих на нормальное функционирование мембран, поиска способов предварительной обработки исходных растворов перед подачей на мембранные аппараты и методов регенерации

мембранных элементов от осадков, образующихся в процессе очистки ОТМ [12, 13]. Научно-исследовательские работы, необходимые для выдачи исходных данных, проводились на испытательных стендах, включающих проточную мембранную трубчатую ячейку (рис.1).

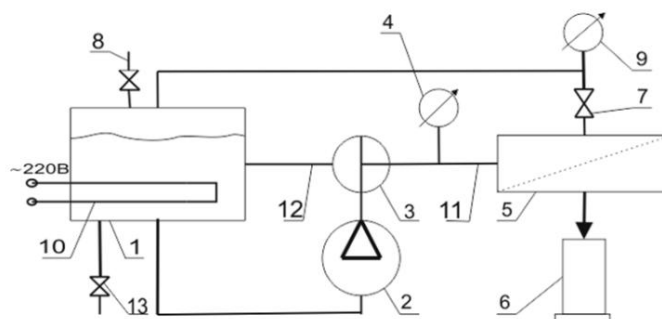


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной ультрафильтрационной установки:

1 - резервуар с отработанным моторным маслом; 2 - насос, 3-трехходовой кран; 4,9 - манометры соответственно на входе и выходе из фильтрующего модуля; 5 – ультрафильтрационный модуль; 6 - мерная колба с пермеатом; 7 - запорная арматура; 8 – кран для залива отработанного масла; 10 – нагревательный прибор; 11 – напорная магистраль;

12 - байпасная магистраль; 13 – вентиль сливной

Fig. 1. Schematic diagram of a laboratory ultrafiltration unit:

1 - tank with spent engine oil; 2 - pump, 3-three-way valve; 4,9 – pressure gauges, respectively, at the inlet and outlet of the filter module; 5 - ultrafiltration module; 6 - dimensional flask with permeate; 7 - shut-off valves; 8 – valve for waste oil filling;

10 – heating device; 11 – pressure line; 12 - bypass line; 13 – drain valve

Основными задачами этого этапа работы являлись:

- определение типа мембран для очистки отработанных масел [12];
- оценка временного изменения проницаемости и селективности мембран [11];
- оценка улучшения качества пермеата после коагуляции [13];
- нахождение способа предварительной обработки ОТМ с целью удаления компонентов, отрицательно влияющих на работу мембран [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований было определено, что процесс ультрафильтрации наиболее эффективен при обработке отработанных масел с концентрацией растворенных веществ 0,1 до 5 % масс.

На основании опытных проверок была выбрана серийно выпускаемая керамическая мембрана марки КУФЭ производства ООО «Керамикфильтр», г. Москва с данными, представленными в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики керамической мембраны
Table 1. Characteristics of the ceramic membrane

Материал фильтрующего слоя мембран	Технические характеристики				
	Средний диаметр пор, мкм	Допустимый диапазон, рН	Производительность по дистиллированной воде при $\Delta p = 0,5 \text{ МПа}$, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	Термическая устойчивость не более, °С	Предельное рабочее давление, МПа
Керамика Al_2O_3	0,1	1-13	1,2	500	0,6 – 0,8
Керамика Al_2O_3	0,05	1-13	0,8	500	0,6 – 0,8
Керамика Al_2O_3	0,01	1-13	0,3	500	0,6 – 0,8

Полимерные типы мембран (УФФК, ПВХ, ПСА, МПВХ, ПС) были исключены по соображениям низкой температуры эксплуатации, небольшой долговечности и невозможности восстановления пропускной способности методом обратной промывки. Оценка временного дрейфа показала, что производительность и селективность мембран незначительно снижалась в течение первого периода испытаний (от 98 до 93%), в дальнейшем выходила на плато и оставалась постоянной.

При определении степени концентрирования исходного сырья было найдено, что удовлетворительной величиной коэффициента уменьшения его объема следует считать $K_{yo} = 2,5$, который рассчитывается по выражению

$$K_{yo} = \frac{V_{исхОМ}}{V_{концОМ}}, \quad (1)$$

где $V_{исхОМ}$ - объем исходного обработанного масла в приемном резервуаре;

$V_{концОМ}$ - объем концентрата в приемном резервуаре, образующийся в процессе разделения отработанных масел ультрафильтрацией.

Повышение K_{yo} приводит к увеличению концентрационной (КП) и гелевой (ГП) поляризации поверхности разделения и проскоку асфальтосмолистых продуктов старения масел в пермеат.

Результаты анализов, полученные при уменьшения исходного объема ОТМ в приемном резервуаре до величины $K_{yo} = 2,5$ представлены в таблицах 2 и 3.

Анализ данных, представленных в таблицах 2 и 3 показывает эффективность ультрафильтрации ОТМ. Так оптическая плотность уменьшилась почти в 7 раз. Это значит, что из исходного раствора практически были удалены асфальтосмолистые продукты старения масел.

Таблица 2

Результаты анализа исходного раствора, концентрата и пермеата при $K_{yo} = 2,5$
Table 2. Results of the analysis of the initial solution, concentrate and permeate at $K_{yo} = 2.5$

Определяемый показатель, единица измерения	Результаты анализа		
	исходное	концентрат	пермеат
1	2	3	4
Кинематическая вязкость при 100 °С $\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	13,32	13,11	11,48
Температура вспышки в открытом тигле, °С	225	223	238
Водородный показатель, рН	7,72	7,83	7,9
Щелочное число в мг/КОН на 1 мг масла	9,02	8,14	0,57
Массовая доля воды, %	следы	отсутствие	отсутствие
Оптическая плотность, см-1	234	289	35
Массовая доля механических примесей, %	0,004	0,009	0,0001
Плотность фактическая при 20 °С, кг/м ³	895	895	883

Таблица 3

Содержание металлов в разделяемых маслах
Table 3. Metal content in separated oils

Определяемый показатель, единица измерения	Результаты анализа		
	исходное	концентрат	пермеат
1	2	3	4
Свинец (Pb), г/т масла, не более	0,472	0,581	0,331
Олово (Sn), г/т масла, не более	0,212	0,281	0,193
Хром (Cr), г/т масла, не более	0,449	0,641	0,247
Молибден (Mo), г/т масла, не более	1,354	1,146	0,860
Никель (Ni), г/т масла, не более	0,366	0,702	0,233
Медь (Cu), г/т масла, не более	2,431	3,408	2,416
Кремний (Si), г/т масла, не более	13,370	5,797	5,249
Железо (Fe), г/т масла, не более	65,905	90,004	45,127
Алюминий (Al), г/т масла, не более	1,210	1,957	0,464



Рис.2. Фотография трубчатого мембранного элемента опытно-промышленной установки
Fig. 2. Photo of a tubular membrane element of a pilot plant

Уменьшения вязкости и понижение щелочного числа говорит об отделении из отработанного масла сработанных вязкостных (загущающих) присадок.

Вязкостные присадки — это высокомолекулярные полимеры, имеющие переменную растворимость в масле при разной температуре, благодаря чему они повышают вязкость масла и уменьшают изменение вязкости при изменении температуры.

Вязкостные присадки меньше загущают базовое масло при низкой температуре, чем при высокой. В качестве присадок применяют полиизобутилены, полиметакрилаты, сополимеры стирола с диенами, сополимеры олефинов.

Кроме этого, вязкостным присадкам придуют антиокислительные, диспергирующие или депрессорные свойства. Последующие этапы лабораторных исследований имели своей целью ресурсные испытания мембранных элементов и определение параметра фильтруемости для выбора способов предочистки отработанных масел от взвешенных частиц и воды. Исследовательские работы проводились на опытной установке, основным узлом которой являлся мембранный элемент.

Мембранный элемент позволял имитировать работу промышленного мембранного модуля, состоящего из одноканальных трубчатых элементов (рис.2), т.к. тип мембранного элемента, скорости потоков, перепад давления, концентрации примесей и температура ведения процесса в опытной установке были выбраны такие же как в проектируемом ультрафильтрационном узле.

Данные опытных исследований легли в основу расчета промышленной схемы узла ультрафильтрационной очистки отработанных масел и определение коэффициентов масштабного перехода не потребовалось.

Для выбора способа предочистки была проведена оценка загрязненности примесями трех типов исходного сырья:

- ОТМ после гравитационного осаждения методом естественного отстоя;
- ОТМ после коагуляции;
- ОТМ после осаждением в поле центробежных сил.

Полученные анализы образцов позволили рекомендовать после предварительного отстоя в специальных резервуарах направлять ОТМ на коагуляцию, где производится разрушение пептизационного действия диспергирующих присадок, укрупнение частиц загрязнений, и затем на предочистку методом центробежной сепарации, с целью уменьшения доли взвешенных частиц от 5 до 30 мкм. Именно такие размеры частиц имеют наибольшую интенсивность осаждения из турбулентного потока разделяемого раствора, что подтвердило выкладки, изложенные в модели по определению коэффициента массоотдачи от ядра потока к поверхности мембраны [11].

Завершающим этапом НИОКР было определение рекомендаций по регенерации мембран от загрязнений. Для этого были проведены исследования по двум направлениям.

В первом направлении исследовалось влияние различных растворителей на разрушение осадка и отработка режимов промывки.

Во втором исследовалось возможность применение регенерации методом обратной промывки пермеатом [14]. В результате проведенных экспериментальных исследований, изложенных в работе [14] наиболее эффективным, и наименее затратным является второй способ.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ литературных источников показал, что к настоящему времени накоплен обширный объем научных данных о баромембранных процессах разделения жидкостей для подготовки и очистки сточных вод промышленных предприятий: установлены и исследованы принципиальные схемы массопереноса через полупроницаемые перегородки - мембраны; хорошо

изучены и даны математические описания процессов обратного осмоса и ультрафильтрации водных растворов солей в полуволоконных и плоскосторонних аппаратах; создана методика расчета подобных аппаратов на основе параметра переноса и энергии гидратации, эмпирических корреляций, уравнений конвективной диффузии и массопереноса. Однако методы математического моделирования на основе законов массопереноса при исследовании процессов ультрафильтрации вязких гетерогенных систем еще недостаточно широко применяются на практике, хотя их преимущества очевидны.

2. Предложенная усовершенствованная методология исследования устанавливает связь между параметрами, которые влияют на процесс ультрафильтрации и позволяют управлять им в зависимости от вида и состава исходной ВГС, конструкции аппарата, площади поверхности разделения, параметров режима фильтрации, величины температуры разделяемой среды, скорости течения и перепада давления, а также показателями и характеристиками, которые позволяют оценивать результаты этой обработки (динамика изменения концентрации примесей в концентрате и пермеате, потери давления и проницаемости, стоимость технологического оборудования и себестоимость технологического процесса).

Это позволяет исследовать закономерности и характеристики процессов ультрафильтрации вязких гетерогенных систем с использованием средств компьютерного моделирования, выполнять расчёт устройств для очистки таких систем, режимов их работы, а также выполнять теоретическими методами исследования и сравнительные оценки этих установок.

3. Разработанные математические модели и расчётные методики, входящие в состав предложенной методологии, базируются на анализе и обобщении обширных сведений литературных источников, отражают протекающие в пограничных слоях физико-химические процессы и учитывают влияние большинства технических и технологических факторов, что открывает широкие возможности для проведения научных исследований и разработок средствами вычислительной техники, существенно сокращая объёмы длительных и дорогостоящих экспериментальных исследований.

4. Выполненные эксперименты в лабораторных и производственных условиях позволили проверить адекватность методологии исследования и предложенных математических моделей, а также подтвердили возможность и целесообразность использования баромембранных процессов

при очистке ВГС, содержащие высокомолекулярные углеводородные соединения нефти. Одновременно выявлен ряд преимуществ применения ультрафильтрации по сравнению с традиционными методами очистки отработанных масел. Например, отсутствуют выбросы опасных газов в атмосферу, небольшие габаритные размеры и мобильность аппаратов, низкая стоимость оборудования, вследствие использования комплектующих отечественного производства.

5. Лабораторные и производственные эксперименты продемонстрировали высокую надёжность, удобство и целесообразность практического применения для разделения вязких гетерогенных систем процессов ультрафильтрации с использованием полимерных и керамических мембран с размером пор 0,05 – 0,01 мкм.

Обобщение полученного опыта и расчётные оценки показывают, что существует возможность создания установок с производительностью от 10 до 20 дм³/м²·ч для очистки практически любых вязких сильнозагрязнённых ВГС с использованием унифицированных ультрафильтрационных трубчатых модулей. Результаты исследований подтверждают ресурс керамических мембран при условии соблюдения технологических режимов до 5 лет.

6. На основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований массообмена на полупроницаемых поверхностях с отбором массы разработаны ресурсосберегающие технологические схемы установок регенерации рабочих жидкостей на основе отработанных масел. Установка регенерации отработанных моторных масел, разработанная на основе использования трубчатых ультрафильтрационных мембран, запатентована и внедрена в ООО «Ультрапор» [15].

Финансирование: Экспериментальная часть работы выполнена на средства гранта по договору 3642ГС1/60673 от 06.08.2020 Федерального государственного бюджетного учреждения "Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере".

Благодарности: Автор выражает глубокую признательность Заслуженному деятелю науки РФ, академику РААСН, доктору технических наук, профессору Сергею Викторовичу Федосову и доктору технических наук, профессору Юрию Павловичу Осадчему за большую помощь и постоянное внимание к работе.

Financing: The experimental part of the work was carried out at the expense of a grant under the agreement 3642GS1/60673 dated 06.08.2020 of the Federal State Budgetary Institution "Fund for Assis-

tance to the Development of Small Forms of Enterprises in the Scientific and Technical Sphere".

Acknowledgements: The author expresses deep gratitude to the Honored Scientist of the Russian Federation, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor Sergey Viktorovich Fedosov and Doctor of Technical

Sciences, Professor Yuri Pavlovich Osadchy for great help and constant attention to the work.

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **Волкова А.В.** Рынок отходов производства и потребления. М.: НИУ Высшая школа экономики, 2018. 87 с. <https://dcenter.hse.ru/data/2018/07/11/1151608260> Заглавие с экрана. – (дата обращения: 10.08.23г.)
2. **Шашкин П.И.** Регенерация отработанных нефтяных масел. М.: Химия, 1970. 304 с.
3. **Caо Yu, Li J.** Used lubricating oil recycling using a membrane filtration: Analysis of efficiency, structural and composing. *Desalination and Water Treatment*. 2009. V. 11(1-3). P. 73-80. DOI:10.5004/dwt.2009.8454.
4. **Rudnick L.R.** Synthetics, Mineral Oils, and Bio-Based Lubricants: Chemistry and Technology. CRC Press. 2020. 1194 p. DOI:10.1201/9781315158150.
5. **Francois A.** Waste Engine Oils: Rerefining and Energy Recovery. Elsevier Science. 2006. 340 p. eBook ISBN:97800804
6. **Brinkman D.W., Parry B.J.** Recycling Oil. In Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley & Sons, Inc. 2005. DOI:10.1002/0471238961.15091202050311.a01.pub2
7. **Firas A.** Design Aspects of Used Lubricating Oil Rerefining. Elsevier. 2006. 122 p. DOI:10.1016/B978-0-444-52228-3.X5000-6
8. **Бобков, С., Астраханцева, И., & Галиаскаров Э.** Применение системного подхода при разработке математических моделей. *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение*. 2021. № 1(65). С. 66-71. DOI: 10.6060/snt.20216501.0008
9. **Fedosov S.V., Maslennikov V.A., Osadchii Y.P., Markelov A.V.** Pressure loss along the channel of a tubular membrane during the ultrafiltration of liquid media. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2020. T. 54. № 2. P. 380-387. DOI:10.1134/S0040579520010078
10. **Федосов С.В., Осадчий Ю.П., Маркелов А.В.** Моделирование процесса ультрафильтрации с учетом образования осадка на поверхности мембраны. *Мембраны и мембранные технологии*. 2020. Т. 10. № 3. С. 177-189. DOI: 10.1134/S0040579520010078
11. **Федосов С.В., Осадчий Ю.П., Маркелов А.В., Соколов А.В.** Математическое моделирование турбулентной миграции частиц в пограничном слое трубчатого мембранного элемента. *Мембраны и мембранные технологии*. 2021. Т. 11. № 6. С. 435-446. DOI: 10.1134/S2218117221060043
12. **Федосов С.В., Блиничев В.Н., Маслеников В.А., Осадчий Ю.П., Маркелов А.В.** Механизм закупоривания полимерных мембран при разделении отработанных моторных масел. *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2015. Т. 58. № 8. С. 79-82.
13. **Федосов С.В., Маркелов А.В., Соколов А.В., Осадчий Ю.П.** Коагуляция и ультрафильтрация: гибридный процесс очистки отработанных моторных масел. *Мембраны и мембранные технологии*. 2022. Т. 12. № 5. С. 341-350.

REFERENCES

1. **Volkova A.V.** The market of production and consumption waste. M.: Higher School of Economics, 2018. 87 p. <https://dcenter.hse.ru/data/2018/07/11/1151608260> Title from the screen. – (date of circulation: 10.08.23)
2. **Shashkin P.I.** Regeneration of spent petroleum oils. M.: Chemistry, 1970. 304 p.
3. **Caо Yu, Li J.** Used lubricating oil recycling using a membrane filtration: Analysis of efficiency, structural and composing. *Desalination and Water Treatment*. 2009. V. 11(1-3). P. 73-80. DOI:10.5004/dwt.2009.8454.
4. **Rudnick L.R.** Synthetics, Mineral Oils, and Bio-Based Lubricants: Chemistry and Technology. CRC Press. 2020. 1194 p. DOI:10.1201/9781315158150.
5. **Francois A.** Waste Engine Oils: Rerefining and Energy Recovery. Elsevier Science. 2006. 340 p. eBook ISBN: 97800804
6. **Brinkman D.W., Parry B.J.** Recycling Oil. In Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley & Sons, Inc. 2005. DOI:10.1002/0471238961.15091202050311.a01.pub2
7. **Firas A.** Design Aspects of Used Lubricating Oil Rerefining. Elsevier. 2006. 122 p. DOI:10.1016/B978-0-444-52228-3.X5000-6
8. **Bobkov S., Astrakhantseva I., & Galiaskarov E.** Application of a systematic approach in the development of mathematical models. *Modern high-tech technologies. Regional application*. 2021. N 1(65). P. 66-71. DOI: 10.6060/snt.20216501.0008. (in Russian).
9. **Fedosov S.V., Maslennikov V.A., Osadchii Y.P., Markelov A.V.** Pressure loss along the channel of a tubular membrane during the ultrafiltration of liquid media. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2020. T. 54. № 2. P. 380-387 DOI:10.1134/S0040579520010078
10. **Fedosov S.V., Osadchy Yu.P., Markelov A.V.** Modeling of the ultrafiltration process taking into account the formation of sediment on the membrane surface. *Membranes and membrane technologies*. 2020. Vol. 10. N 3. P. 177-189. DOI: 10.1134/S0040579520010078. (in Russian).
11. **Fedosov S.V., Osadchy Yu.P., Markelov A.V., Sokolov A.V.** Mathematical modeling of turbulent migration of particles in the boundary layer of a tubular membrane element. *Membranes and membrane technologies*. 2021. Vol. 11. N 6. P.435-446. DOI: 10.1134/S2218117221060043
12. **Fedosov S.V., Blinichev V.N., Maslennikov V.A., Osadchy Yu.P., Markelov A.V.** The mechanism of clogging of polymer membranes during separation of used motor oils. *News of higher educational institutions. Series: ChemChemTech*. 2015. Vol. 58. N 8. P. 79-82.
13. **Fedosov S.V., Markelov A.V., Sokolov A.V., Osadchy Yu.P.** Coagulation and ultrafiltration: hybrid process of purification of used motor oils. *Membranes and membrane technologies*. 2022. Vol. 12. N 5. P. 341-350. DOI: 10.31857/S221811722. (in Russian).

Инженерно-технические науки – машиностроение и технологии

14. **Маркелов А.В., Соколов А.В.** Регенерация ультрафильтрационных мембран в процессе разделения водомасляных систем. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. Вып. 1. С. 114–119. DOI: 10.6060/ivkkt.20236601.6618
15. Устройство по очистке жидкости: пат. 215789 Рос. Федерация: МПК В01D 61/18 (2006.01) / Маркелов А.В., Осадчий Ю.П., Пахотин Н.Е., Постников А.В., Долганов А.В.; заявитель и патентообладатель ООО «Ультрапор». № 2021117534; заявл. 16.06.2021; опубл. 27.12.2022, Бюл. № 36. 7 с.
14. **Markelov A.V., Sokolov A.V.** Regeneration of ultrafiltration membranes in the process of separating oil-water systems. *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. T. 66. N 1. P. 114-119 DOI: 10.6060/ivkkt.20236601.6618.
15. Liquid cleaning device: pat. 215789 Ros. Federation: IPC B01D 61/18 (2006.01) / Markelov A.V., Osadchy Yu.P., Pakhotin N.E., Postnikov A.V., Dolganov A.V.; applicant and patent holder of LLC "Ultrapor". N 2021117534; application. 06/16/2021; publ. 12/27/2022, Bul. N 36. 7 p.

Поступила в редакцию 28.05.2023
Принята к опубликованию 11.07.2023

Received 28.05.2023
Accepted 11.07.2023