

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАННОГО МОТОРНОГО МАСЛА

© А. В. Маркелов^{1,2}, Ю. П. Осадчий³

¹ Ярославский государственный технический университет (ЯГТУ),
150023, г. Ярославль, Московский пр., д. 88

² Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН,
119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский пр., д. 29

³ Ивановский государственный политехнический университет,
153000, г. Иваново, Шереметевский пр., д. 21
E-mail: aleksandr203.37@mail.ru

Поступила в Редакцию 9 декабря 2024 г.

После доработки 27 декабря 2024 г.

Принята к публикации 27 декабря 2024 г.

Исследован процесс регенерации отработанных моторных масел с использованием ультрафильтрационных полимерных мембран на основе фторопласта. Показано, что на сопротивление массопереносу через мембрану в процессе ультрафильтрации отработанных моторных масел оказывает значительное влияние концентрирование в примембранном слое задерживаемых продуктов деструкции масла. В результате проведенных экспериментов была определена зависимость сопротивления концентрации поляризации от времени. Полученная эмпирическая зависимость использовалась для численно-аналитического решения задачи по определению удельной производительности мембран и концентрации продуктов окисления масла в питающем резервуаре. Верификация модели путем сравнения экспериментальных и расчетных значений концентрации примесей показала погрешность не более 5%, а удельной производительности — в пределах 10–15%. Данный подход можно использовать для определения периодичности профилактических воздействий по восстановлению проницаемости мембран в инженерных расчетах подобных баромембранных аппаратов.

Ключевые слова: *отработанное моторное масло; ультрафильтрация; полимерные мембраны; концентрационная и гелевая поляризация; моделирование*

DOI: 10.31857/S0044461824110070; EDN: PTNOLY

Российский рынок отработанных моторных масел (ОММ) является самым крупным в Европе. По разным оценкам, объем подобных отходов составляет около 1 млн тонн [1]. В Российской Федерации глубокой переработке подвергаются около 15–25% от собранного объема отработанных моторных масел [1], а основным методом утилизации является их сжигание [1], в то время как в странах ЕС и США этот показатель составляет 50–75% [2, 3].

В процессе эксплуатации в моторных маслах накапливаются продукты деструкции, связанные с их разложением, окислением, полимеризацией, конденсацией углеводородов, разбавлением топливом и водой. В результате протекания комплекса процессов старения образуются вязкие высокомолекулярные асфальто-смолистые соединения, соли, кислоты, продукты кокса, сажи в виде взвешенных частиц, а также механические примеси [4]. Однако отработанные

масла в своем составе содержат от 70 до 80% ценного базового сырья, которое целесообразно вернуть в производственный цикл [4].

Методы очистки ОММ основаны на физических, физико-химических, химических и комбинированных процессах. Физические и физико-химические методы хорошо удаляют взвешенные частицы размером от 1 до 100 мкм [5, 6], химические методы позволяют отделить асфальто-смолистые и другие высокомолекулярные продукты окисления [7, 8], но имеют ряд существенных недостатков, основные из которых — это высокие затраты энергии и образование опасных трудноутилизуемых отходов, например кислых гудронов [9].

На современном этапе развития технологии представляется возможным использовать для регенерации отработанных моторных масел мембранные технологии, которые малоотходны, не требуют использования химических реагентов, низкоэнергозатратны, компактны в аппаратном оформлении [10] и позволяют отделять как взвешенные коллоидные частицы, так и вязкие продукты окисления. Однако в процессе мембранного разделения на поверхности фильтров происходит повышение концентрации указанных веществ, что ухудшает эффективность процесса [11]. Для уменьшения влияния концентрационной поляризации на процесс ультрафильтрации жидких сред используется ряд технологических решений (определенные гидродинамические режимы [12], волновое облучение [1], коагуляция [13], комбинированное воздействие [12] и др.).

Один из подходов к описанию процессов ультрафильтрации основан на методе последовательных сопротивлений [14, 15]. Основой данной модели является закон Дарси [16]:

$$u = \frac{k}{\eta} \text{grad} p, \quad (1)$$

где p — внешнее давление (Па), η — коэффициент динамической вязкости (Па·с), k — коэффициент проницаемости материала фильтра (м^2), u — скорость фильтрата через проницаемую перегородку ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$).

Из уравнения (1) следует, что скорость потока через фильтр прямо пропорциональна градиенту давления и обратно пропорциональна гидравлическому сопротивлению через него.

Суммарное гидравлическое сопротивление (рис. 1) определяется по выражению [17]

$$R_{\Sigma} = R_m + R_p + R_a + R_{cp} = R_m + R_t, \quad (2)$$

где R_m , R_p , R_a , R_{cp} , R_t — типы сопротивлений массопереносу в процессе ультрафильтрации соответственно: мембраны, перекрытия пор, адсорбции, повышенной концентрации растворенных веществ, суммарные гидравлические сопротивления без учета сопротивления самой мембраны (м^{-1}).

Удельную производительность мембраны G , $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, можно найти по выражению [17].

$$G = \frac{\Delta p}{\eta R_{\Sigma}}, \quad (3)$$

где Δp — перепад давления на мембране (Па).

В результате анализа экспериментальных данных при тупиковой фильтрации был сделан вывод о том, что механизм изменения общего гидравлического сопротивления происходит под действием параллельных процессов: полное или частичное закупорива-

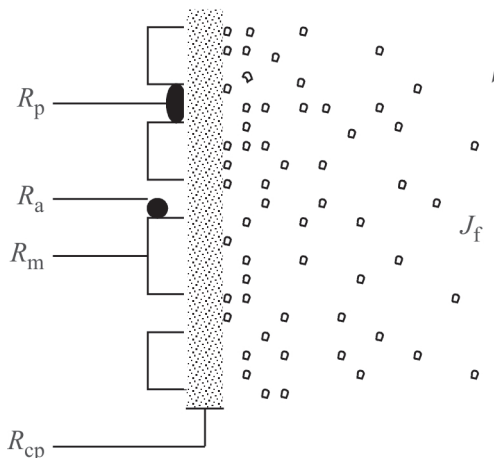


Рис. 1. Различные типы сопротивлений массопереносу через мембрану.

R_p — перекрытие пор, R_a — адсорбция, R_m — мембрана, R_{cp} — слой повышенной концентрации растворенных веществ.

ние пор, постепенное закупоривание с образованием осадка и др. [14, 15].

Цель исследования — разработка методик для инженерного расчета и проектирования баромембранных аппаратов для ультраfiltrации ОММ с использованием трубчатого мембранного модуля проточного типа, которые основаны на подходе последовательных сопротивлений.

Задачи теоретического и экспериментального характера:

- определить гидравлические сопротивления мембраны и слоя повышенной концентрации асфальто-смолистых веществ у ее поверхности;
- определить концентрацию асфальто-смолистых примесей (дисперсной фазы) в резервуаре с исходным ОММ в зависимости от времени ведения процесса разделения в режиме рецикла;
- разработать численно-аналитическую модель изменения удельной производительности процесса разделения;
- провести верификацию полученной модели.

Экспериментальная часть

Разделяемой средой являлось отработанное моторное масло марки Лукойл Luxe 5W40 с содержанием

вязких продуктов окисления — асфальто-смолистых соединений 5–7 мас%. В качестве ультрафильтров использовались трубчатые ультрафильтрационные мембраны на основе фторопласта Ф-42Л марки УФФК (ЗАО НТЦ «Владипор»).

Очистка отработанных моторных масел осуществлялась на лабораторной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 2.

Перед ультраfiltrацией оно подвергалось предварительной очистке от механических частиц размером более 5 мкм и воды на центробежном сепараторе. Полученный раствор из резервуара 1 насосом подавался в трубчатую одноканальную мембранную ячейку. При этом пермеат (очищенное масло) отводился в мерный стакан, а концентрат (асфальто-смолистые вещества) возвращались в резервуар, и цикл повторялся.

Ультраfiltrация отработанных моторных масел проводилась при следующих наиболее эффективных рабочих режимах [13]: давление над мембраной $\Delta p = 0.4$ МПа, температура раствора $t = 353$ К, скорость входящего потока в трубчатую мембрану $v = 5$ м·с⁻¹.

Поток разделяемого раствора проходит трубчатый мембранный модуль за 0.12 с, а общее время разделения составляет $36 \cdot 10^2$ с. Таким образом, весь процесс разделения разбивается на 30 000 циклов по

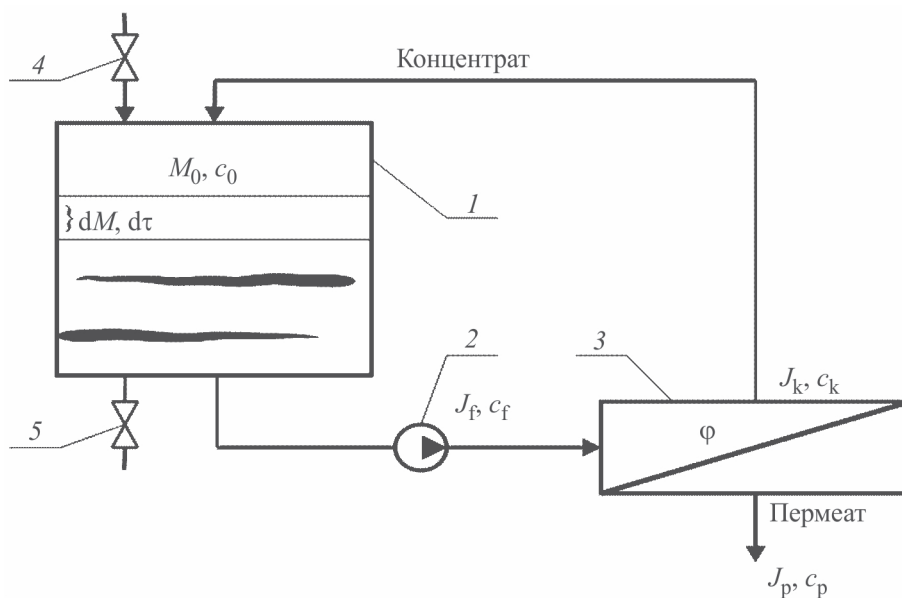


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторной установки.

1 — резервуар с ОММ, 2 — насос, 3 — трубчатый мембранный модуль, 4 — клапан для заполнения резервуара, 5 — клапан для отвода концентрата.

M_0, c_0 — масса (кг) и концентрация примесей в потоке отработанного масла в резервуаре (кг·кг⁻¹) в начальный момент времени при $\tau = 0$; J_f, J_k, J_p — соответственно массовые расходы масла на входе в мембранный модуль, в концентрате и пермеате (кг·с⁻¹); c_f, c_k, c_p — соответственно массовые концентрации вредных примесей в потоках масла на входе в мембранный модуль, в концентрате и пермеате; ϕ — коэффициент селективности; dM — изменение массы масла в резервуаре за единицу времени $d\tau$.

0.12 с каждый. Через каждые 3000 циклов был произведен анализ пробы раствора в исходном резервуаре. Определяли концентрацию асфальто-смолистых примесей стандартным гравиметрическим методом с добавлением осадителя — эфир петролейный с температурным пределом перегонки 40–70°C, химически чистый 95 об% производства АО «Экос-1» — и стабилизатора — толуол чистый 99.8 мас% для анализа в нефтехимической промышленности производства АО «Экос-1». Коэффициент динамической вязкости определяли на ротационном вискозиметре LVTV-2C (PingXuan).

Удельную производительность мембраны определяли объемом пермеата V , получаемого с единицы рабочей поверхности мембраны F_m в единицу времени τ . Объем пермеата определяли с помощью мерного стакана, время — секундомером.

Гидравлическое сопротивление мембраны R_m было определено предварительно на чистом масле той же марки после выхода удельной производительности мембраны G_0 на плато (рис. 3) по выражению (4) и составляло $7 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-1}$.

$$R_m = \frac{\Delta p}{G_0 \eta_0}, \quad (4)$$

где G_0 — удельная производительность мембраны по чистому маслу ($\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$), η_0 — коэффициент динамической вязкости чистого масла при температуре $t = 353 \text{ К}$, $\eta_0 = 16 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Гидравлические сопротивления слоя повышенной концентрации асфальто-смолистых примесей на поверхности мембраны R_t можно найти, используя формулу (3) после экспериментального определения удельной проницаемости G отработанных моторных масел и гидравлического сопротивления мембраны R_m (5).

$$R_t = \frac{\Delta p}{G \eta} - R_m. \quad (5)$$

Данный подход широко используется для подобных расчетов при исследовании баромембранных процессов разделения водных растворов [18].

Различия заключаются в том, что для определения сопротивления самой мембраны используется дистиллированная вода, поскольку она наиболее близка по своим вязкостно-температурным свойствам к пермеату. В нашем случае сопротивление мембраны рассчитывается по чистому моторному маслу, так как оно не содержит асфальто-смолистых продуктов деструкции, образующих концентрационную поляризацию в примембранном слое потока, и оно наиболее близко по коэффициенту динамической вязкости к пермеату.

Численно-аналитическая модель изменения удельной производительности процесса разделения отработанных моторных масел. При решении поставленной задачи были приняты следующие допущения: подача насоса принимается постоянной; в исходном резервуаре режим идеального смешивания; режим течения разделяемой жидкости ламинарный; мембранный модуль является аппаратом идеального вытеснения.

Численно-аналитическая модель строится на системе дифференциальных уравнений: баланса массовых расходов по растворителю в исходном резервуаре 6, баланса массовых расходов по асфальто-смолистым примесям в исходном резервуаре 7, материального баланса мембранного модуля по асфальто-смолистым примесям 8, а также на уравнении материального баланса входящего потока в мембранном модуле 9.

$$dM = -J_f d\tau + J_k d\tau, \quad (6)$$

$$d(Mc_f) = -J_f c_f d\tau + J_k c_k d\tau, \quad (7)$$

$$c_f dM + M dc_f = -J_p c_p d\tau + J_k c_k d\tau, \quad (8)$$

$$J_f = J_k + J_p \quad (9)$$

при начальных условиях

$$M(0) = M_0 \text{ и } \tau(0) = 0. \quad (10)$$

Разделяемый поток масла проходит через мембранный модуль и возвращается в резервуар. Для первого цикла циркуляции уравнение материального баланса по асфальто-смолистым примесям описывается уравнением (11). Из литературы [19] извест-

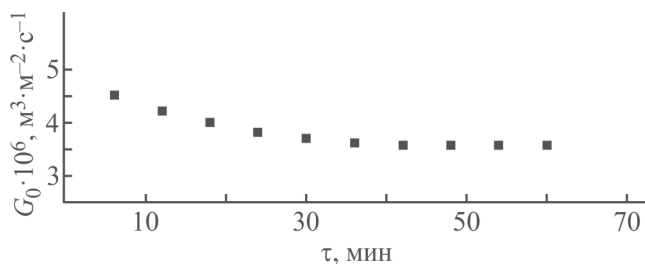


Рис. 3. Удельная производительность мембраны УФФК по чистому моторному маслу марки Лукойл Luxe 5W40.

но, что связь между концентрациями примесей в исходном потоке c_f и пермеате c_p определяется коэффициентом наблюдаемой селективности φ (12). С учетом выражений (11) и (12) уравнения (7) и (8) после соответствующих преобразований примут вид (13) и (14).

$$J_f c_f = J_p c_p + J_k c_k, \quad (11)$$

$$\varphi = \frac{c_f - c_p}{c_f}, \quad (12)$$

$$M dc_f = c_f J_p d\tau - J_p c_f (1 - \varphi) d\tau, \quad (13)$$

$$\frac{dc_f}{d\tau} = \frac{c_f J_p \varphi}{M}. \quad (14)$$

Массовый поток пермеата J_p ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) можно записать в виде уравнения (15). Тогда при подстановке уравнения (15) выражения (13) и (14) преобразуются в выражения (16) и (17).

$$J_p = G \rho F_m, \quad (15)$$

где F_m — полезная площадь мембраны (м^2), ρ — плотность разделяемой жидкости ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$).

$$\frac{dM}{d\tau} = -G \rho F_m, \quad (16)$$

$$\frac{dc_f}{d\tau} = \frac{c_f G \rho F_m \varphi}{M}. \quad (17)$$

В процессе проведения экспериментов по очистке ОММ было установлено (рис. 4), что суммарное гидравлическое сопротивление (рис. 1) на поверхности мембраны R_t (2) изменяется во времени по зависимости, которую можно аппроксимировать линейной функцией (18). Тогда выражение (3) для определения

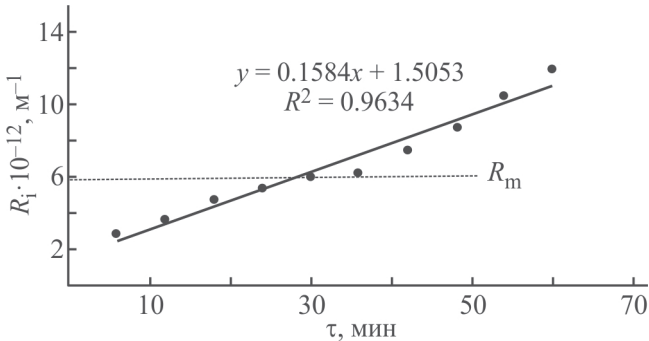


Рис. 4. Изменение гидравлического сопротивления на мембране УФФК в зависимости от времени при $\Delta p = 0.4$ МПа, $t = 363$ К, $v = 5$ м \cdot с $^{-1}$.

удельной производительности мембраны можно записать в виде уравнения (19).

$$R_t = a\tau + b, \quad (18)$$

где a , b — коэффициенты аппроксимации.

$$G = \frac{\Delta p}{\eta(R_m + a\tau + b)}. \quad (19)$$

Аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов позволила найти эмпирическую формулу (20) для функции $R_t = f(\tau)$. Формула (20) справедлива для ультрафильтрации отработанного моторного масла через мембрану УФФК при указанных выше рабочих режимах ведения эксперимента. С учетом уравнения (20) выражение (19) по определению удельной производительности мембраны УФФК примет вид (21).

$$R_t = 0.1584\tau + 1.5053, \quad (20)$$

$$G = \frac{\Delta p}{\eta[R_m + (0.1584\tau + 1.5053) \cdot 10^{12}]}. \quad (21)$$

С учетом (21) равенства (16) и (17) примут вид

$$\frac{dM}{d\tau} = -F_m \rho \frac{\Delta p}{\eta(R_m + a\tau + b)}, \quad (22)$$

$$\frac{dc_f}{d\tau} = -c_{f0} F_m \rho \varphi \frac{\Delta p}{M \eta(R_m + a\tau + b)}. \quad (23)$$

Между коэффициентами кинематической ν и динамической вязкости η имеется зависимость (24). После разделения переменных и интегрирования уравнение (22) с учетом (24) можно записать в виде (25).

$$\eta = \nu \rho, \quad (24)$$

$$M = -\frac{F_m \Delta p}{\nu} \frac{1}{a} \ln|a\tau + R_m + b| + c_1. \quad (25)$$

При начальных условиях (10) константа интегрирования определяется по выражению (26). Тогда выражение для определения изменения массы разделяемой жидкости в исходном резервуаре примет вид (27).

$$c_1 = M_0 + \frac{F_m \Delta p}{\nu a} \ln|R_m + b|, \quad (26)$$

$$M = M_0 + \frac{F_m \Delta p}{\nu a} \ln \left| \frac{R_m + b}{a\tau + R_m + b} \right|. \quad (27)$$

После подстановки выражения (27) в дифференциальное уравнение (23) оно примет вид (28). После разделения переменных интегральное выражение

$$\frac{dc_f}{d\tau} = c_{f_0} F_m \Phi \frac{\Delta p a}{\left[M_0 v a + F_m \Delta p \left(\ln \left| \frac{R_m + b}{a\tau + R_m + b} \right| \right) (a\tau + R_m + b) \right]}, \quad (28)$$

$$c_f = \int c_{f_0} F_m \Phi \frac{\Delta p a}{\left[M_0 v a + F_m \Delta p \left(\ln \left| \frac{R_m + b}{a\tau + R_m + b} \right| \right) (a\tau + R_m + b) \right]} d\tau + c_2. \quad (29)$$

Введем новую переменную (30). Интегрирование уравнения (29) с учетом выражения (30) дает решение первообразной функции в виде (31).

$$Z = \frac{R_m + b}{a\tau + R_m + b}, \quad (30)$$

$$c_f = -\Phi c_{f_0} \ln \left(\frac{F_m \Delta p \ln z}{M_0 a v} + 1 \right). \quad (31)$$

За один цикл поток разделяемой жидкости проходит через ультрафильтр и поступает в исходный резервуар. Число циклов можно представить в виде выражения (32). Изменение концентрации асфальто-смолистых примесей в резервуаре после каждого цикла можно записать в виде уравнения (33).

$$n = \frac{\tau}{\tau_c}, \quad (32)$$

где τ — общее время концентрирования асфальто-смолистых примесей (мин); τ_c — время цикла, равное одному проходу жидкости через мембранный элемент (мин).

$$c_f^B = \frac{M_0^A - J_f c_f \tau_c + J_k c_k \tau_c}{M_0^M - (J_f q + J_p F_m) \tau_c}, \quad (33)$$

где M_0^A — исходная масса продуктов деструкции в резервуаре (кг), M_0^M — исходная масса ОММ без учета асфальто-смолистых примесей в резервуаре (кг), q — массовая доля чистого масла в исходном потоке.

Для определения отношения массы асфальто-смолистых примесей, содержащихся в резервуаре, к объему жидкости в нем можно использовать выражение

$$c_f^{B'} = \frac{M_0^A - J_f c_f \tau_c + J_k c_k \tau_c}{V_B}, \quad (34)$$

где V_B — объем жидкости в исходном резервуаре (m^3).

для определения концентрации асфальто-смолистых примесей в резервуаре имеет вид (29).

Обсуждение результатов

Для верификации полученного численно-аналитического решения задачи по определению изменения производительности в зависимости от роста гидравлического сопротивления производились замеры объема отобранного пермеата и концентрации примесей в исходном резервуаре и сравнение их значений с расчетными (рис. 5, 6).

Анализ графиков на рис. 5 подтверждает адекватность предложенного решения, так как относительная погрешность экспериментальных и расчетных значений концентрации асфальто-смолистых примесей в процессе ультрафильтрации отработанных моторных масел через мембрану УФФК в исходном резервуаре составляет в среднем 3.6%.

Относительная погрешность расчетных и экспериментальных значений удельной производительности не превышает 10% до 120 циклов, или 18 мин ведения процесса разделения отработанных моторных масел. Затем погрешность составляет 10–15% (рис. 6). Данное явление можно объяснить тем, что

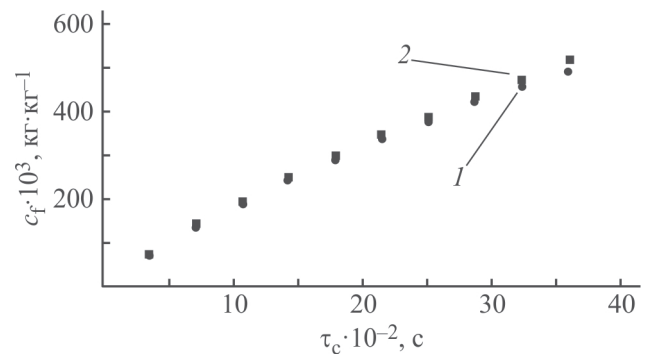


Рис. 5. Изменение концентрации асфальто-смолистых примесей в процессе ультрафильтрации отработанных моторных масел через мембрану УФФК в исходном резервуаре во времени.

1 — экспериментальные данные, 2 — расчетные значения.

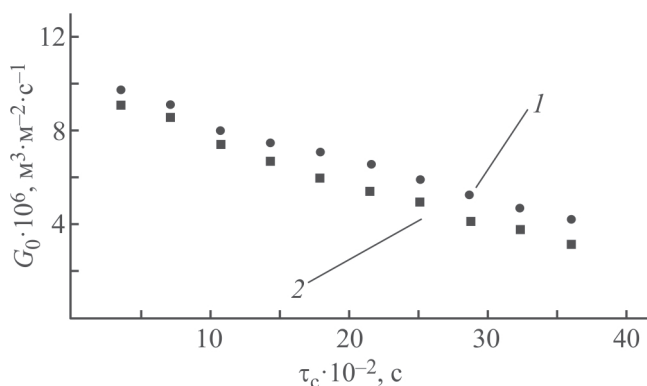


Рис. 6. Изменение удельной производительности мембраны УФФК при ультрафильтрации отработанного моторного масла во времени.

1 — расчетные значения, 2 — экспериментальные данные.

на процесс образования лимитирующего слоя кроме концентрационной поляризации влияет осаждение осадка из потока на поверхность мембраны, которое в данном исследовании не учитывалось.

Выводы

Верификация предложенного численно-аналитического решения показывает возможность применения подхода последовательных сопротивлений при исследовании процесса ультрафильтрации отработанных моторных масел и разработки на ее основе метода инженерного расчета аппаратов по очистке отработанных моторных масел. Модель позволяет определять зависимость падения удельной производительности от времени ведения процесса и обоснованно определить периодичность профилактических мероприятий по регенерации мембранных элементов.

Математическая обработка результатов эксперимента показывает, что основными гидравлическими сопротивлениями массопереносу через мембрану в процессе ультрафильтрации отработанных моторных масел являются концентрационная поляризация и образование осадка на поверхности мембраны.

Введенная новая переменная z может быть интерпретирована как коэффициент, влияющий на изменение производительности процесса ультрафильтрации отработанного моторного масла с учетом образования дополнительного гидравлического сопротивления на поверхности мембраны вследствие образования слоя повышенной концентрации растворенных веществ.

Данный подход может быть использован для различных отработанных вязких нефтепродуктов (транс-

форматорные, гидравлические, трансмиссионные, компрессорные, промышленные и другие масла), но в каждом конкретном случае необходимо провести ряд экспериментов по определению падения удельной производительности с целью определения коэффициентов аппроксимации точечных значений суммарных гидравлических сопротивлений R_t на поверхности мембраны от времени.

Финансирование работы

Работа 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».

Конфликт интересов

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

Информация об авторах

Маркелов Александр Владимирович, д.т.н.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7125-6570>

Осадчий Юрий Павлович, д.т.н.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2279-0990>

Список литературы

- [1] Выборнова Т. С., Власова Г. В., Пименов Ю. Т. Очистка минеральных и синтетических моторных масел от механических примесей посредством физических воздействий // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2023. № 2. С. 172–184. <https://dx.doi.org/10.17122/ogbus-2023-2-172-184>
- [2] Jurny M., Elbourawi M., Zorgani E. Recycling of used engine oil using extraction by single solvent // Am. J. Chem. Eng. 2023. V. 11. N 2. P. 33–38. <https://doi.org/10.11648/j.ajche.20231102.11>
- [3] Pinheiro C. T., Quina M. J., Gando-Ferreira L. M. Management of waste lubricant oil in Europe: A circular economy approach // Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 2021. V. 51. P. 2015–2050. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1771887>
- [4] Остриков В. В., Афоничев Д. Н., Оробинский В. И., Балабанов В. И. Удаление продуктов старения из работающих моторных масел без их слива из картеров двигателей машин // Химия и технология топлив и масел. 2020. № 3 (619). С. 18–21. <https://www.elibrary.ru/kklsjd>
[Ostrikov V. V., Afonichev D. N., Orobinskii V. I., Balabanov V. I. Removal of aging products from

- working motor oils without draining them from engine crankcases // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2020. V. 56. N 3. P. 347–351.
<https://doi.org/10.1007/s10553-020-01162-2>.
- [5] *Sholl D. S., Lively R. P.* Seven chemical separations to change the world // *Nature*. 2016. V. 532. N 7600. P. 435–437. <https://doi.org/doi:10.1038/532435a>
- [6] *Картошкин А. П.* Концепция сбора и переработки отработанных смазочных масел // *Химия и технология топлив и масел*. 2003. № 4 (518). С. 3–5. <https://elibrary.ru/phgvxr?ysclid=m5u00243pb769144386>
[Kartoshkin A. P. The notion of collection and treatment of spent lube oils // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2003. V. 39. N 4. P. 155–158.
<https://doi.org/10.1023/A:1025436609440>].
- [7] *Mandloi H., Thakur L. S.* A Review on recycle of waste lubricant oil and its properties enhancement // *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 2023. N 11. P. 4368–4371. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.54461>
- [8] *Nissar A., Hanief M., Mir F. Q.* Critical retrospection and evaluation of waste engine oil recycling methods // *Int. J. Energy Water Resour.* 2023. N 7. P. 453–464. <https://doi.org/10.1007/s42108-023-00240-5>
- [9] *Nebesskaya A., Kanateva A., Borisov R., Yushkin A., Volkov V., Volkov A.* Polyacrylonitrile ultrafiltration membrane for separation of used engine oil // *Polymers*. 2024. V. 16. N 20. ID 2910. <https://doi.org/10.3390/polym16202910>
- [10] *Sarkar S., Datta D., Deepak K. S., Mondal B. K., Das B.* Comprehensive investigation of various re-refining technologies of used lubricating oil: A review // *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 2023. N 25. P. 1935–1965.
<https://doi.org/10.1007/s10163-023-01685-w>
- [11] *Markelov A. V., Sokolov A. V.* Regeneration of ultrafiltration membranes in the process of separating oil-water systems // *ChemChemTech*. 2023. V. 66. N 1. P. 114–119.
<https://doi.org/10.6060/ivkkt.20236601.6718>
- [12] *Markelov A. V., Nebesskaya A. P., Shvorobey Yu. V., Yushkin A. A., Volkov A. V., Volkov V. V.* Regeneration of used engine oil with ultra filtration membranes // *Processes of Petrochemistry and oil Refining*. 2024. N 4. P. 1064–1071.
<https://doi.org/10.62972/1726-4685.2024.4.1064>
- [13] *Федосов С. В., Маркелов А. В., Соколов А. В., Осадчий Ю. П.* Коагуляция и ультрафильтрация: гибридный процесс очистки отработанных моторных масел // *Мембраны и мембран. технологии*. 2022. Т. 12. № 5. С. 341–350.
<https://doi.org/10.31857/S2218117222050054>
[Fedosov S. V., Markelov A. V., Sokolov A. V., Osadchy Yu. P. Coagulation and ultrafiltration: A hybrid process for purification of used engine oils // *Membranes and Membrane Technologies*. 2022. V. 4. N 5. P. 297–305.
<https://doi.org/10.1134/S2517751622050055>].
- [14] *Wang L., Cao T., Dykstra J. E., Porada S., Biesheuvel P. M., Elimelech M.* Salt and water transport in reverse osmosis membranes: Beyond the solution-diffusion model // *Environ. Sci. Technol.* 2021. V. 55. N 24. P. 16665–16675.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05649>
- [15] *Ho C.-C.* A combined pore blockage and cake filtration model for protein fouling during microfiltration // *J. Colloid Interface Sci.* 2000. V. 232. N 2. P. 389–399.
<https://doi.org/10.1006/jcis.2000.7231>
- [16] *Жужиков В. А.* Теория и практика фильтрования суспензий. М.: Химия, 1971. С. 24–41.
- [17] *Waite T. D., Schäfer A. I., Fane A. G., Heuer A.* Colloidal fouling of ultrafiltration membranes: Impact of aggregate structure and size // *J. Colloid Interface Sci.* 1999. V. 212 (2). P. 264–274.
<https://doi.org/10.1006/jcis.1998.6040>
- [18] *Costa A. R., de Pinho M. N., Elimelech M.* Mechanism of colloidal natural organic matter in ultrafiltration // *J. Membr. Sci.* 2006. V. 281. P. 716–725.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.04.044>
- [19] *Дытнерский Ю. И.* Баромембранные процессы. Теория и расчет. М.: Химия, 1986. С. 59–61.