

АНАЛИЗ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ПРОЦЕССАХ МИКРОФИЛЬТРАЦИОННОЙ И ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОТОПЛИВА

С.И. Лазарев, С.А. Нагорнов, С.В. Ковалев, Д.Н. Коновалов, А.Ю. Корнев

Сергей Иванович Лазарев (ORCID 0000-0003-0746-5161), Дмитрий Николаевич Коновалов (ORCID 0000-0002-9366-8661)

Кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, Тамбов, Российская Федерация, 392000
E-mail: sergey.lazarev.1962@mail.ru, kdn1979don@mail.ru

Станислав Александрович Нагорнов (ORCID 0000-0003-0224-3632), Алексей Юрьевич Корнев (ORCID 0000-0002-2765-2506)

Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, Ново-Рубежный пер., 15, Тамбов, Российская Федерация, 392000
E-mail: snagornov@yandex.ru, mikhail7@yandex.ru

Сергей Владимирович Ковалев (ORCID 0000-0002-5961-7561)*

Кафедра математического моделирования и информационных технологий, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, ул. Интернациональная, 33, Тамбов, Российская Федерация, 392000
E-mail: sseedd@mail.ru

На основе предварительных исследований и литературных данных выбраны объекты исследования (микрофильтрационная мембрана МФФК-3, предварительный фильтр ПП-190, СОО НПП «Техн. фильтр» г. Владимир). Приведены характеристики по очистке органических растворов для производства биотоплива с применением методов микрофильтрации, предварительной фильтрации при трансмембранном давлении $P = 0,15 \dots 0,5$ МПа и получены зависимости удельного выходного потока для пористых пленок МФФК-3, ПП-190 от времени проведения эксперимента. На основе анализа зависимости функции $J = f(\tau, P)$ мембранной системы показано, что с увеличением продолжительности экспериментальных исследований по удельному выходному потоку пермеата для мембраны МФФК-3 он снижается в интервале времени от 600 до 1200 с при трансмембранном давлении 0,15 МПа (первый период - блокировка пор органическими соединениями). Второй период от 1200 до 5400 с - создание примембранного гелевого слоя. Третий период от 5400 до 7200 с - уплотнение примембранного слоя. Четвертый период от 7200 до 10800 с - установившийся режим разделения. При концентрировании органического раствора для производства биотоплива отмечается, что с течением времени воды в исходном растворе становится больше, а эфира метанола и кислот (маргариноолеиновая, олеиновая, бегеновая, эруковая, докозадиеновая) меньше, за счет проникания их в пермеат. При увеличении трансмембранного давления от 0,15 до 0,35 МПа наблюдается повышение удельного выходного потока, что связано с ростом движущей силы процесса баромембранного разделения, но наблюдается и его снижение для давления 0,5 МПа. Это, вероятно, связано с изменением концентрации ретентата, а также его кинематической вязкости и плотности в связи с прониканием в пермеат части воды. Для фильтрования исследуемого раствора на предварительном фильтре ПП-190 отмечается, что с увеличением продолжительности экспериментальных исследований удельный выходной поток снижается (скорость фильтрования уменьшается по нелинейному закону), а сопротивление слоя осадка органических веществ увеличивается. Выполненный хроматографический анализ пермеата и концентрата после микрофильтрационной очистки показал, что через мембранную перегородку проходят такие компоненты, как метанол, маргариноолеиновая, олеиновая, бегеновая, эруковая, докозадиеновая кислоты, образуя на поверхности динамический гелевый слой, тем самым предотвращая пропускание молекул воды.

Ключевые слова: микрофильтрация, биотопливо, вода, метанол, удельный выходной поток, концентрация

ANALYSIS OF KINETIC CHARACTERISTICS IN THE PROCESSES OF MICROFILTRATION AND FILTRATION PURIFICATION OF ORGANIC SOLUTIONS FOR THE PRODUCTION OF BIOFUELS

S.I. Lazarev, S.A. Nagornov, S.V. Kovalev, D.N. Konovalov, A.Yu. Kornev

Sergey I. Lazarev (ORCID 0000-0003-0746-5161), Dmitry N. Konovalov (ORCID 0000-0002-9366-8661)
Department of Mechanics and Engineering Graphics, Tambov State Technical University, Sovetskaya st., 106,
Tambov, 392000, Russia
E-mail: sergey.lazarev.1962@mail.ru, kdn1979dom@mail.ru

Stanislav A. Nagornov (ORCID 0000-0003-0322-3682), Alexey Yu. Kornev (ORCID 0000-0002-2765-2500)
All-Russian Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Oil Products in Agriculture, Tambov,
Novo-Rubizhny lane, 15, 392000, Russia
E-mail: snagornov@yandex.ru, viitinlab7@yandex.ru

Sergey V. Kovalev (ORCID 0000-0002-5361-7561)*
Department of Mathematical Modeling and Information Technologies, Dezhnev Tambov State University, In-
ternational st., 33, Tambov, 392000, Russia
E-mail: sseedd@mail.ru *

On the basis of preliminary research and literature data, research objects were selected (microfiltration membrane MFFK-3, pre-filter PP-190, OGC NPP Technofilter, Vladimir). The characteristics for the purification of organic solutions for the production of biofuel using the methods of microfiltration, preliminary filtration at a transmembrane pressure $P = 0.15 \dots 0.5$ MPa are given, and the dependences of the specific output flow for porous films MFFK-3, PP-190 on the time of the experiment were obtained. Based on the analysis of the dependence of the function $J = f(\tau, P)$ of the membrane system, it was shown that with an increase in the duration of experimental studies on the specific output permeate flux for the MFFK-3 membrane it decreases in the time interval from 600 to 1200 s at a transmembrane pressure of 0.15 MPa (the first period is the blockage of pores with organic compounds). The second period from 1200 to 5400 s is the creation of a near-membrane gel layer. The third period from 5400 to 7200 s is the compaction of the near-membrane layer. The fourth period from 7200 to 16800 s is the steady state separation mode. When concentrating an organic solution for the production of biofuel, it is noted that over time, there is more water in the original solution, and there is less ether, methanol and acids (margarine oleic, oleic, behenic, urucic, prodiene) due to their penetration into the permeate. With an increase in the transmembrane pressure from 0.15 to 0.35 MPa, an increase in the specific output flow is observed, which is associated with an increase in the driving force of the baromembrane separation process, but its decrease is also observed for a pressure of 0.5 MPa. This is probably due to a change in the concentration of the retentate, as well as in its kinematic viscosity and density, due to the penetration of some of the water into the permeate. For filtering the test solution on the preliminary filter PP-190 it is noted that with an increase in the duration of experimental studies, the specific output flux decreases (the filtration rate decreases according to a nonlinear law), and the resistance of the organic matter sediment layer increases. The chromatographic analysis of the permeate and concentrate after microfiltration purification showed that such components as methanol, margarine oleic, oleic, behenic, urucic, and prodiene acids pass through the membrane partition, forming a dynamic gel layer on the surface, thereby preventing the passage of water molecules.

Key words: microfiltration, biofuel, water, methanol, specific output flux, concentration

Для цитирования:

Лазарев С.И., Нагорнов С.А., Ковалев С.В., Коновалов Д.Н., Корнев А.Ю. Анализ кинетических характеристик в процессах микрофильтрационной и фильтрационной очистки органических растворов для производства биотоплива. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 1. С. 50–57

For citation:

Lazarev S.I., Nagornov S.A., Kovalev S.V., Konovalov D.N., Kornev A.Yu. Analysis of kinetic characteristics in the processes of microfiltration and filtration purification of organic solutions for the production of biofuels. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 1. P. 50–57

ВВЕДЕНИЕ

При очистке биологических, пищевых жидкостей, а также топлив и масел, фильтрация и баромембранные процессы (микро-, ультра-, нано-фильтрация) сопровождаются осадко- и гелеобразованием, своеобразным воздействием компонентов водной среды, эмульсий на поверхность активного слоя мембран [1-4]. Фильтрационные и баромембранные процессы, применяемые на промышленных предприятиях машиностроения, химической, биологической, пищевой промышленности для разделения технологических растворов, требуют современного конструктивного оформления аппаратов, обеспечивающих высокое качество очистки и разделения, хорошую производительность при малых энергозатратах [1-3].

В литературе имеется небольшое количество публикаций, посвященных исследованию фильтрации, мембранной технологии для очистки, разделения топлив и масел.

На основе проведенных исследований по регенерации отработанных масел и топлив в работе [9] предлагается технология и регламент экстракционной очистки (рафинирования).

Материалы исследований, представленные в работе [10], показывают эффективность физико-химических методов очистки дизельных топлив от смол, серы и других примесей. Применение отстивания и центрифугирования также повышает дитивоизносительные свойства дизельного топлива.

В работе [11] отмечается, что наиболее выгодным сырьем для производства биодизеля (транспортного топлива, альтернативного нефтяному дизелю) является осадки канализационных очистных предприятий, донные илы, извлекаемые из водоемов при восстановлении качества воды, так как практически не требуются затраты на производство этого сырья. Кроме того, происходит утилизация таких отходов.

Исследования характеристик дизельного двигателя с турбонаддувом и состава выхлопных газов, проведенные в работе [12], доказали эффективность применения добавок биотоплива (метанола, бутанола и этанола) в сравнении с очищенным дизельным топливом вследствие отсутствия в составе серы и серной кислоты.

В литературе [13] представлены результаты экспериментальных исследований разделения водонефтяных эмульсий при мембранной очистке через ацетатцеллюлозные мембраны. Доказана высокая способность влияния деэмульгаторов марки СНПХ на разделение водонефтяных эмульсий.

В работе [14] исследовано влияние параметров униполярного коронного разряда (время обработки, напряжение) на кинетические характеристики полиэфирсульфоновой мембраны при разделении модельных эмульсий типа «нефть в воде». Получены изображения с изменениями сорбционной поверхности мембран, обработанных в коронном разряде.

Ультрафильтрация водомасляной эмульсии типа «масло в воде» с применением композитных мембран с динамическим слоем исследована в литературе [15]. Установлено снижение концентрации нефтепродуктов в ретрикатах. Для удаления органических загрязнителей в составе многоступенчатой системы очистки динамические мембраны ультрафильтрации показали высокую эффективность.

В литературе [16] доказано, что коронная обработка полиакрилонитрильных и полиэфирсульфоновых мембран в поле униполярного коронного разряда позволяет повысить производительность мембранной очистки эмульсий типа «масло в воде» при уменьшении токсичности пермеатов.

Для очистки отработанных моторных масел в работе [17] предлагается мембранная технология разделения жидких полидисперсных систем, которая позволяет снизить энергоемкость перерабатываемого продукта.

Для очистки и разделения отработанного моторного масла в статье [18] предлагается баромембранный метод (нанофильтрация), который показывает свою перспективность.

В источнике [19] проведены исследования баромембранного процесса очистки и разделения моторных масел с применением микрофильтрационных мембран (полимерные, металлокерамические, керамические, углеродные). Доказано, что кинетические характеристики процесса микрофильтрации оказывает влияние материал мембраны и ее размеры.

В работе [20] исследован процесс ультрафильтрации отработанного моторного масла, позволяющий определить температуру вспышки системы «масло-присадка», разделив его на компоненты. Понижение температуры вспышки очищенного масла возможно добавлением реагента на основе химических элементов, из которых состоит применяемая в масле присадка.

Выполненный обзор работ [9-20] позволяет отметить, что повышение качества топлива, снижающего количество вредных выбросов в атмосферу,

в настоящее время является актуальной задачей и относится к приоритетным направлениям развития экономики и промышленности как в РФ, так и за ее пределами. Поэтому целью работы является проведение кинетических и хроматографических исследований по влиянию трансмембранного давления на кинетические характеристики пористых пленок МФФК-3, ПП-190 в процессе мембранной очистки биотоплива.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектами исследования являлись смесь метилового эфира растительного масла (Э-фаза) и воды в соотношении 1:1 (объемом 5 л), а также исходные и рабочие образцы микрофильтрационной мембраны МФФК-3 и предварительного фильтра ПП-190 (производства ООО НПФ «Технофильт», Владимир), характеристики которых представлены в табл. 1, 2 [1].

Таблица 1
Характеристики микрофильтрационной мембраны МФФК-3
Table 1. Characteristics of the microfiltration membrane МФФК-3

Средний диаметр пор, мкм	Производительность по отношению к спирту, при $P=0,05$ МПа J , $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, не менее	Точка пропускания, мкм	Рабочее давление, кПа (кгс/см ²) не менее	Максимальная температура, К	Диапазон pH
0,45	7500	56	0,56	353	1-13

Таблица 2
Характеристики предварительного фильтра ПП-190
Table 2. Characteristics of the pre-filter ПП-190

Эффективность удержания частиц, мкм		Начальная производительность по отношению к воде, при $P=0,05$ МПа, $\text{см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$, не менее	Максимальный перепад давления, МПа	Максимальная температура, К	Диапазон pH
не менее 98%	не менее 95%				
3	2	100	0,5 при 293 °К, 0,7 при 353 °К	363	2-13

Микрофильтрационная фторопластовая композиционная гидрофобная мембрана типа МФФК представляет собой пористый полимерный пленочный материал на основе фторопласта Ф42Л на подложке из нетканых материалов (полипропилен, пивсан) с размером пор 0,45 мкм и общей пористостью 80-85% [21]. Полипропиленовые фильтры марки ПП используются для предварительной и тонкой осветляющей фильтрации жидкостей с высоким уровнем отделения частиц или для снижения нагрузки на мембранные фильтры [21].

Методика исследования кинетических характеристик пористых пленок при микрофильтрационном разделении технологических растворов подробно описана в литературе [3, 22]. Эксперимент проводился на установке, представленной в литературе [3].

Одним из главных элементов установки является рабочая ячейка плоскокамерного типа, в которой непосредственно происходит процесс микрофильтрационного разделения. Конструкция микрофильтрационной ячейки представлена в литературе [3, 22].

Удельный выходной поток, полученный через мембранную перегородку, рассчитывается по следующей зависимости [23, 24]:

$$V = \frac{V}{F_m \cdot \tau}; \quad (1)$$

где V – объем собранного пермеата, м³; F_m – рабочая площадь мембраны, м²; τ – время проведения эксперимента, с.

Полученные образцы пермеата и ретентата после фильтрации через мембрану МФФК-3 анализировали на содержание растворенных компонентов при помощи хроматографии, а также определяли вязкость и плотность раствора.

Для проведения хроматографического анализа использовали метод внутреннего стандарта. При приготовлении калибровочных образцов и внутреннего стандарта используют хроматографически чистые вещества. Анализ проводят в соответствии с инструкцией работы на хроматографе. Для анализа используется аппаратно-программный комплекс «Кристалл 4000М» с пламенно-ионизационным детектором, с делением потока 1:30, диапазоном формируемых давлений 20-250 кПа.

Технические данные аппаратно-программного комплекса «Кристалл 4000М». Температура колонки: 170-280 °С со скоростью подъема 15 °С/мин. Температура детектора: 290 °С. Температура испарителя: 280 °С. Количество изотерм – 1. Скорость

охлаждения: от 280 до 50 °С за 16 мин. Температурная стабильность: 0,1 °С. Газ-носитель: расход от 10 до 100 мл/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ни рис. 1 представлены зависимости удельного выходного потока для пористых пленок МФФК-3 (а) и ПП-190 (б) от времени эксперимента при различном трансмембранном давлении.

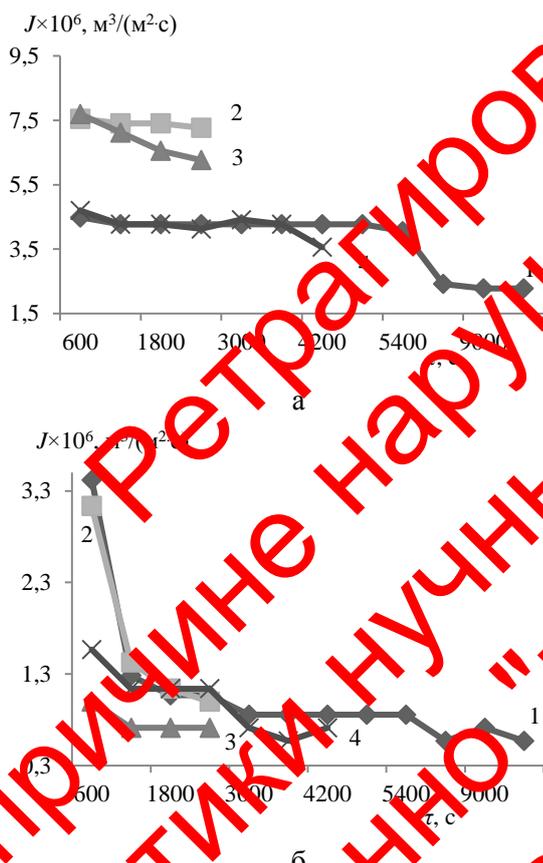


Рис. 1. Зависимость удельного выходного потока для мембраны МФФК-3 (а) и предварительного фильтра ПП-190 (б) от времени эксперимента при трансмембранном давлении P: 1 - 0,15 МПа; 2 - 0,25 МПа; 3 - 0,35 МПа; 4 - 0,5 МПа
 Fig. 1. Dependence of the specific output flow for the МФФК-3 membrane (а) and the ПП-190 prefilter (б) on the time of the experiment at the transmembrane pressure P: 1 - 0,15 MPa; 2 - 0,25 MPa; 3 - 0,35 MPa; 4 - 0,5 MPa

Анализ зависимости функции $J = f(\tau, P)$ мембранной системы (рис. 1 а) показал, что с увеличением продолжительности экспериментальных исследований по удельному выходному потоку пермеата мембраны МФФК-3 он снижается, особенно четко это наблюдается в интервале времени от 600 до 1200 с, при трансмембранном давлении равном 0,15 МПа (первый период). Это, вероятно, связано с частичным блокированием пор органическими соединениями, содержащимися в исходном

растворе. Однако далее наблюдается установившийся период (второй период (от 1200 до 5400 с)), вероятно, при этом некоторые органические соединения (кислоты) исходного раствора на поверхности мембраны уже создали примембранный гелевый слой, а другие движутся над этим примембранным слоем. Таким образом, можно предположить, что над поверхностью мембраны, из оставшихся элементов формируется динамический гелевый слой, причем его формирование заканчивается уплотнением примембранного слоя во временном интервале от 5400 до 7200 с (третий период), что отмечается на рис. 1а. Подобное утверждение может быть связано с тем, что с течением времени воды в исходном растворе становится больше за счет концентрования, а эфиры и кислоты меньше, за счет проникновения их в пермеат. Дальнейшее фильтрование происходит в установившемся режиме от 7200 до 10800 с (четвертый период).

Тем не менее с ростом трансмембранного давления от 0,15 до 0,25 МПа наблюдается увеличение удельного выходного потока, что связано с возрастанием движущей силы процесса баромембранного разделения. При дальнейшем увеличении трансмембранного давления происходит снижение удельного выходного потока на мембране. Вероятно, основная причина этому – изменение концентрации ретентата, а также его кинематической вязкости и плотности в связи с проникновением в пермеат части воды.

Анализ зависимости функции $J = f(\tau, P)$ мембранной системы (рис. 1 б) показал, что с увеличением продолжительности экспериментальных исследований удельный выходной поток пермеата предварительного фильтра ПП-190 подчиняется уравнению фильтрования в интегральной форме при постоянном трансмембранном давлении. С течением времени скорость фильтрования уменьшается по нелинейному закону (т.к. сопротивление осадка увеличивается), а удельный объем фильтра и высота слоя осадка увеличиваются [25]. С ростом трансмембранного давления от 0,15 до 0,35 МПа также отмечается уменьшение удельного выходного потока.

Хроматографическим методом обнаружено, что после мембранной фильтрации смеси метилового эфира растительного масла (Э-фаза) и воды происходит изменение ее компонентного состава, табл. 3.

Учитывая, что процесс микрофильтрационного разделения показал свою эффективность, анализ хроматограмм проводится именно после баромембранного разделения. Фиксируется различие

хроматограмм пермеата и концентрата после разделения. Анализ показал, что после разделения через микрофильтрационную мембрану проходят такие компоненты, как метанол, маргариноолеиновая, олеиновая, бегеновая, эруковая, докозадиеновая кислоты, образуя на поверхности частичный динамический гелевый слой, тем самым затормаживая пропускание молекул воды. При этом концентрация метанола в образце № 1 пермеата (при трансмембранном давлении 0,15 МПа) более чем в 3 раза превышает концентрацию метанола в образце № 4 пермеата (при трансмембранном давлении 0,5 МПа), что хорошо коррелирует с полученными данными кинетических характеристик мембранного разделения. Однако под действием трансмембранного давления происходит пропуск небольшого количества воды.

Таблица 3

Изменение компонентного состава смеси метилового эфира растительного масла (Э-фаза) и воды после микрофильтрационной очистки

Table 3. Change in the component composition of a mixture of vegetable oil methyl ester (E-phase) and water after microfiltration purification

Наименование компонента	Концентрация, %		
	Образец № 1	Образец № 4	Образец № 5
метанол	6,048	1,899	1,056
маргариноолеиновая кислота	5,680	5,822	6,408
олеиновая кислота	8,660	9,075	9,128
бегеновая кислота	6,194	6,194	2,997
эруковая кислота	7,070	7,151	5,386
докозадиеновая кислота	6,027	1,898	2,164

Результаты анализа образцов пермеата и ретентата после микрофильтрационной очистки на мембране МФФК-3 по содержанию воды, плотность, вязкость представлены в табл. 4.

По результатам проведенных исследований установлено, что принципиально процесс микрофильтрационной очистки позволяет разделить воду и Э-фазу, однако сразу после разделения достаточно высокое содержание воды в любой пробе все еще достаточно высокое по сравнению с нормами, как для дизельного топлива (≤ 200 мг/кг), так и для эфиров (≤ 500 мг/кг).

После отстаивания в течение нескольких часов часть воды выпала на дно емкости, и в объеме её содержание снизилось (рис. 2).

Таким образом, для отделения воды от Э-фазы необходимо поддержание давления в баромембранной системе не менее 0,5 МПа, однако при

этом количество воды остается слишком большим (0,18 %) и для доведения ее содержания до нормы – от 0,02 % для ДТ до 0,05 % для биодизеля нужно проводить доочистку или повторно разделять полученный пермеат. Минимального значения 0,05 % удалось достичь при отстаивании и декантировании верхнего слоя образца.

Таблица 4

Физико-химические характеристики образцов пермеата и концентрата

Table 4. Physicochemical characteristics of permeate and concentrate samples

Показатель	Номер пробы				
	1	2	3	4	5
Вязкость кинематическая, мм ² /с при 293 К	6,01	5,68	5,48	5,51	4,28
Вязкость кинематическая, мм ² /с при 313 К	3,94	3,97	4,24	4,15	3,88
Плотность, кг/м ³	893,3	889,6	883,4	882,4	940
Содержание воды, %	1,6	1,2	0,6	0,4	40
Водная вытяжка	8,1	7,6	7,2	6,8	12

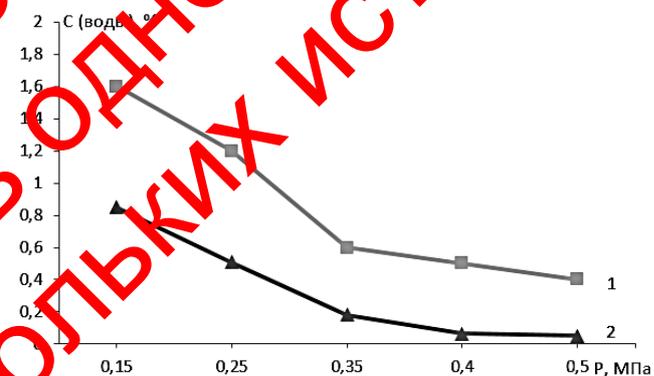


Рис. 2. Зависимость содержания воды в фильтрате от трансмембранного давления (1 - C(воды) перемешивания, %; 2 - C(воды) декантирования, %)

Fig. 2. Dependence of the water content in the filtrate on the transmembrane pressure (1 - C(water) stir, %; 2 - C(water) decanter, %)

ВЫВОДЫ

Исследования процесса микрофильтрационной очистки, проведенные кинетическим и хроматографическим методами, позволяют сделать следующие выводы:

1. Получены кинетические зависимости удельного выходного потока для пористых пленок МФФК-3 и ПП-190 в зависимости от времени при

различном трансмембранном давлении, отмечены четыре периода изменения удельного выходного потока, где формируются гелевые сгустки на мембране МФФК-3, которые существенно влияют на процесс баромембранного разделения, а пре-дифильтр ПП-190 засоряется (забивается). Приведены зависимости содержания воды в пермеате от трансмембранного давления, при этом отмечается, что для отделения воды от Э-фазы необходимо поддерживать давление в мембранной системе не менее 0,5 МПа.

2. Выполненный хроматографический анализ пермеата и концентрата после микрофильтра-

ционной очистки показал, что через мембранную перегородку проходят такие компоненты, как метанол, маргариноолеиновая, олеиновая, бегеновая, эруковая, докозадиеновая кислоты, а некоторые из них служат для образования на поверхности динамического гелевого слоя, тем самым затормаживая пропускание молекул воды.

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

REFERENCES

1. **Липин А.Г., Бурчу М.П., Липин А.А.** Разделение растворов органических веществ и электролитов в электро-мембранном аппарате. *Совр. наукоемк. технол. Рег. прилож.* 2013. № 3 (35). С. 98-101.
2. **Воронюк И.В., Елисеєва Т.В., Селеменев В.Ф.** Особенности кинетики сорбции низших алифатических альдегидов полифункциональным низкоосновным анионообменником. *Сорбц. и хроматограф. проц.* 2020. Т. 20. № 6. С. 765-772. DOI: 10.17308/sorpcrproc.20.0.20/3145.
3. **Лазарев С.И., Ковалев С.В., Конвалов Д.Н., Ковалева О.А.** Анализ кинетических характеристик баромембранного и электробаромембранного разделения раствора аммония. *Изв. вузов. Химия и хим. технол.* 2020. Т. 63. Вып. 9. С. 28-35. DOI: 10.6060/ivkl.20.06309.6196.
4. **Evdokimov I.A., Titov S.A., Polyansky K.K., Saiko D.S.** Ultrafiltration concentrating of curd whey after electroflotation treatment. *Foods Raw Mater.* 2017. V. 55. N 1. P. 131-136. DOI: 10.31179/2308-4057-2017-1-131-136.
5. **Lazarov S.I., Kovalev S.V., Kovaleva O.A., Konovalov D.N.** Design and calculation of effective separation area of flat-chamber electrobaromembrane equipment. *Chem. Petrol. Eng.* 2019. V. 55. N 5-6. P. 353-360. DOI: 10.1007/s10556-019-00630-9.
6. **Lazarov S.I., Kovalev S.V., Kovaleva O.A., Konovalov D.N.** A new electrobaric membrane system for separation of solutions. *Rus. Eng. Res.* 2020. V. 40. N 3. P. 198-201. DOI: 10.3103/S1068798X20030168.
7. **Lazarov S.I., Kovalev S.V., Kovaleva O.A., Rodionov D.A., Lazarev D.S., Konovalov D.N.** Flat-chamber electrobaromembrane apparatus with improved characteristics and its calculation method. *Chem. Petrol. Eng.* 2019. V. 55. N 1-2. P. 114-121. DOI: 10.1007/s10556-019-00590-0.
8. **Kovalev S.V., Lazarov S.I., Konovalov D.N., Lua P.** Efficient design of a flat-chamber-type electrobaromembrane apparatus and a method for calculating structural and technological characteristics in the separation of chemical and engineering industrial solutions. *Chem. Petrol. Eng.* 2020. V. 56. N 1-2. P. 109-115. DOI: 10.1007/s10556-020-00747-2.
9. **Дмитриева З.Т.** О регенерации использованных нефтепродуктов. *Химия и технол. топлив и масел.* 2017. № 4 (602). С. 50-52. DOI: 10.1007/s10553-017-0832-4.
10. **Остриков В.В., Вигдорович В.И., Орбинский В.И., Афоничев Д.Н., Забродский И.А.** Результаты исследования процесса очистки дизельного топлива от примесей в условиях потребителя. *Химия и технол. топлив и масел.* 2018. № 5 (609). С. 53-56.
1. **Lipin A.G., Burchu M.P., Lipin A.A.** Separation of solutions of organic substances and electrolytes in an electro-membrane apparatus. *Sov. Naukoemk. Tekhnol. Reg. Priklzh.* 2013. N 3 (35). P. 98-101 (in Russian).
2. **Voronyuk I.V., Elisheeva T.V., Selemeney V.F.** Features of the kinetics of sorption of lower aliphatic aldehydes by a polyfunctional low-basic anion exchanger. *Sorbts. Khromatog. Prots.* 2020. V. 20. N 6. P. 765-772 (in Russian). DOI: 10.17308/sorpcrproc.20.0.20/3145.
3. **Lazarov S.I., Kovalev S.V., Konovalov D.N., Kovaleva O.A.** Analysis of Kinetic Characteristics of Baromembrane and Electrobaromembrane Separation of Ammonium Nitrate Solution. *ChemPetrolEng [Izv. Vysch. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2020. V. 63. N 9. P. 28-36. DOI: 10.6060/ivkl.20.06309.6196.
4. **Evdokimov I.A., Titov S.A., Polyansky K.K., Saiko D.S.** Ultrafiltration concentrating of curd whey after electroflotation treatment. *Foods Raw Mater.* 2017. V. 55. N 1. P. 131-136. DOI: 10.31179/2308-4057-2017-1-131-136.
5. **Lazarov S.I., Kovalev S.V., Kovaleva O.A., Konovalov D.N.** Design and calculation of effective separation area of flat-chamber electrobaromembrane equipment. *Chem. Petrol. Eng.* 2019. V. 55. N 5-6. P. 353-360. DOI: 10.1007/s10556-019-00630-9.
6. **Lazarov S.I., Kovalev S.V., Kovaleva O.A., Konovalov D.N.** A new electrobaric membrane system for separation of solutions. *Rus. Eng. Res.* 2020. V. 40. N 3. P. 198-201. DOI: 10.3103/S1068798X20030168.
7. **Lazarov S.I., Kovalev S.V., Kovaleva O.A., Rodionov D.A., Lazarev D.S., Konovalov D.N.** Flat-chamber electrobaromembrane apparatus with improved characteristics and its calculation method. *Chem. Petrol. Eng.* 2019. V. 55. N 1-2. P. 114-121. DOI: 10.1007/s10556-019-00590-0.
8. **Kovalev S.V., Lazarov S.I., Konovalov D.N., Lua P.** Efficient design of a flat-chamber-type electrobaromembrane apparatus and a method for calculating structural and technological characteristics in the separation of chemical and engineering industrial solutions. *Chem. Petrol. Eng.* 2020. V. 56. N 1-2. P. 109-115. DOI: 10.1007/s10556-020-00747-2.
9. **Dmitrieva Z.T.** Regeneration of used petroleum products. *Khimiya Tekhnol. Topliv Masel.* 2017. N 4 (602). P. 50-52 (in Russian). DOI: 10.1007/s10553-017-0832-4.
10. **Ostrikov V.V., Vigdorovich V.I., Orbinsky V.I., Afonichev D.N., Zabrodsky I.A.** Results of research of the process of purification of diesel fuel from impurities under consumer conditions. *Khim. Tekhnol. Topliv Masel.* 2018. N 5 (609). P. 53-56 (in Russian).

11. **Kuchkina A.Yu., Sushchik N.N.** Feedstocks, methods and perspectives of biodiesel production. *J. Siber. Fed. Univ. Biol. I.* 2014. № 7. P. 14-42. DOI: 10.17516/1997-1389-0091.
12. **Дэсин П.** Влияние состава топливной смеси с добавками биотоплива на эффективность эксплуатации двигателя внутреннего сгорания и состав выхлопных газов. *Химия и технол. топлив и масел.* 2018. №1 (605). С. 20-24.
13. **Набиев Р.Р., Шайхиев И.Г., Дряхлов В.О., Фазуллин Д.Д.** Влияние типа деэмульгаторов марки СНПК на размер частиц водонефтяных эмульсий и производительность разделения ацетат целлюлозными мембранами. *Вестн. технол. ун-та.* 2021. Т. 24. № 1. С. 52-56.
14. **Шайхиев И.Г., Дряхлов В.О., Галиханов М.Ф., Фазуллин Д.Д., Маврин Г.В.** Разделение водонефтяной эмульсии полиакрилонитрильными мембранами, модифицированными в коронном разряде. *Перспективы материалов.* 2020. № 6. С. 30-37.
15. **Фазуллин Д.Д., Яровикова Д.А., Маврин Г.В., Шайхиев И.Г., Дряхлов В.О.** Параметр процесса ультрафильтрации эмульсии типа «масло в воде» композиционной мембраной с динамическим слоем. *Вестн. технол. ун-та.* 2021. Т. 24. № 1. С. 57-63.
16. **Сафина Г.Ш., Дряхлов В.О., Галиханов М.Ф., Шайхиев Т.И., Фридланд С.В.** Разделение обработанных эмульсий, содержащих нефтепродукты с использованием короннообработанных мембран. *Вестн. технол. ун-та.* 2015. Т. 18. № 14. С. 229-231.
17. **Пахотина И.Е., Осадчий Ю.П., Пахотин Н.Е.** Новые технологии разделения жидких дисперсных систем. *Информ. среда вуза.* 2016. № 1 (23). С. 241-244.
18. **Пахотин Н.Е., Осадчий Ю.П., Пахотина И.Е.** Регенерация отработанных моторных масел с использованием наномембран. *Совр. материал. техника и технол.* 2017. № 7 (15). С. 63-67.
19. **Гриценко В.С., Орлов Н.С.** Применение микрофильтрации для регенерации отработанных моторных масел. *Совр. Критич. технологии. Мембраны.* 2002. № 16. С. 10-16.
20. **Морозов И.В., Осадчий Ю.П., Маркелов А.В., Пахотин Н.Е., Крикунов А.В.** Повышение эффективности регенерации отработанных моторных масел. *Аграр. Вестн. Верхневолжья.* 2018. № 2 (23). С. 87-93.
21. **Технофильтр с ион. СОО НПП Технофильтр.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.technofilter.ru/catalog/laboratory-filtration/filtray-dlya-laboratory/> (дата обращения: 07.02.2021).
22. **Лазарев С.И., Ковалев С.Р., Коновалов Д.Н., Lua P.** Электрохимические и транспортные характеристики мембранных систем при электронно-облучательном разделении растворов, содержащих нитрат аммония и сульфат калия. *Электрохимия.* 2021. Т. 57. № 5. С. 1-21. DOI: 10.1134/S1023193521050098.
23. **Дытнерский Ю.И.** Обратный осмос и ультрафильтрация. М.: Химия. 1978. 352 с.
24. **Свитцов А.А.** Введение в мембранную технологию. М.: ДеЛи принт. 2007. 208 с.
25. **Голубев Г.В.** Математическое моделирование фильтрации в неоднородных трещиновато-пористых средах. *Вестн. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского.* 2011. № 4 (3). С. 725-727.
11. **Kuchkina A.Yu., Sushchik N.N.** Feedstocks, methods and perspectives of biodiesel production. *J. Siber. Fed. Univ. Biol. I.* 2014. № 7. P. 14-42. DOI: 10.17516/1997-1389-0091.
12. **Desing P.** Influence of the composition of the fuel mixture with biofuel additives on the efficiency of the internal combustion engine and the composition of the exhaust gases. *Khim. Tekhnol. Topliv Masel.* 2018. N 1 (605). P. 20-24 (in Russian).
13. **Nabiev R.R., Shaikhiyev I.G., Dryakhlov V.O., Fazullin D.D.** Influence of the type of demulsifier of SNPKh brand on the particle size of water-in-oil emulsions and the productivity of acetate separation by cellulose membranes. *Vestn. Tekhnol. Un-ta.* 2021. V. 24. N 1. P. 52-56 (in Russian).
14. **Shaikhiyev I.G., Dryakhlov V.O., Galikhanov M.F., Fazullin D.D., Mavrin G.V.** Separation of an oil-water emulsion with corona modified polyacrylonitrile membranes. *Perspektiv. Mater.* 2020. N 6. P. 30-37 (in Russian).
15. **Fazullin D.D., Yarovikova D.A., Mavrin G.V., Shaikhiyev I.G., Dryakhlov V.O.** Parameters of the process of ultrafiltration of an oil-in-water emulsion by a composite membrane with a dynamic layer. *Vestn. Tekhnol. Un-ta.* 2021. V. 24. N 1. P. 57-63 (in Russian).
16. **Safina G.Sh., Dryakhlov V.O., Galikhanov M.F., Shaikhiyev T.I., Fridland S.V.** Separation of waste emulsions containing petroleum products using corona treated membranes. *Vestn. Tekhnol. Un-ta.* 2015. V. 18. N 14. P. 229-231 (in Russian).
17. **Pakhotin N.E., Osadchiy Y.P., Pakhotin N.Ye.** New technologies for the separation of liquid polydisperse systems. *Informats. Sreda Vuz.* 2016. N 1 (23). P. 241-244 (in Russian).
18. **Pakhotin N.E., Osadchiy Yu.P., Pakhotina I.N.** Regeneration of used engine oil using nanomembranes. *Sovr. Mater., Tekhnika Tekhnol.* 2017. N 7 (15). P. 63-67 (in Russian).
19. **Gritsenko V.S., Orlov N.S.** Application of microfiltration for the regeneration of used engine oils. *Ser. Kritich. Tekhnol. Membrany.* 2002. N 16. P. 10-16 (in Russian).
20. **Morozov I.V., Osadchiy Yu.P., Markelov A.V., Pakhotin N.Ye., Krikunov A.V.** Improving the efficiency of regeneration of used engine oils. *Agrar. Vestn. Verkhnevolszh'ya.* 2018. N 2 (23). P. 87-93 (in Russian).
21. **Technofilter website of OOO NPP Technofilter.** [Electronic resource]. URL: <https://www.technofilter.ru/catalog/laboratory-filtration/filtray-dlya-laboratory/> (date accessed: 02/07/2021) (in Russian).
22. **Lazarev S.I., Kovalev S.V., Kononov D.N., Lua P.** Electrochemical and transport characteristics of membrane systems in electron filtration separation of solutions containing ammonium nitrate and potassium sulfate. *Elektrokhimiya.* 2021. V. 57. N. 5. P. 1-21 (in Russian). DOI: 10.1134/S1023193521050098.
23. **Dytner'sky Yu.I.** Reverse osmosis and ultrafiltration. M.: Khimiya. 1978. 352 p. (in Russian).
24. **Svitsov A.A.** Introduction to membrane technology. M.: DeLi print. 2007. 208 p. (in Russian).
25. **Golubev G.V.** Mathematical modeling of filtration in heterogeneous fractured-porous media. *Vestn. Nizhegorod. Univ. im. N.I. Lobachevsky.* 2011. N 4 (3). P. 725-727 (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 05.04.2021

Принята к опубликованию (Accepted) 17.11.2021