

АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОФИЛЬТРАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ БИОТОПЛИВА

© Д. Н. Коновалов¹✉, С. И. Лазарев², С. А. Нагорнов³

¹ Кафедра «Техника и технологии автомобильного транспорта»,
kdn1979dom@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация;

² кафедра «Механика и инженерная графика» ФГБОУ ВО «ТГТУ»,
Тамбов, Российская Федерация;

³ лаборатория использования моторного топлива (3),
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования
техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Тамбов, Российская Федерация

Ключевые слова: кинетические характеристики; мембрана; микрофльтрация; разделение; структура; удельный выходной поток.

Аннотация: Проанализированы и интерпретированы кинетические и структурные характеристики процесса микрофльтрационного разделения технологических растворов в производстве биотоплива, показавшие эффективность процесса мембранного разделения водно-органического раствора. Экспериментально получены хроматограммы, дифрактограммы, термограммы и электронные изображения микрофльтрационной мембраны МФФК-3 физическими методами от действия трансмембранного давления и диффузии эфирных масел. На основе полученных экспериментальных данных и разработанного аппаратурного оформления баромембранного процесса модернизирована технологическая схема синтеза биотоплива, позволяющая вернуть в производственный цикл компоненты промывочной воды.

Введение

Технологические растворы и сточные воды различных отраслей промышленности необходимо обрабатывать, используя безотходные или малоотходные технологии, возвращая их компоненты в производственный процесс, что позволит сэкономить не только ресурсы, в том числе энергетические, но и уменьшить экологическую нагрузку на водные объекты Российской Федерации.

Сточная вода образуется в результате использования в бытовом, производственном или сельскохозяйственном употреблении, а также прошедшая через какую-либо загрязненную территорию. Сточные воды в зависимости от условий образования можно разделить на основные категории [1]: бытовые или хозяйственно-фекальные, атмосферные и промышленные.

К *первой* категории относятся стоки, загрязненные примерно 58 % примесями органических и 42 % минеральных веществ (от душевых, бань, прачечных, столовых, туалетов, мытья полов и т.п.). *Вторая* категория – это атмосферные воды, содержащие органические и минеральные вещества (результат выпадения

атмосферных осадков и их отведение с территорий предприятий). К *третьей* категории относятся сточные воды промышленных предприятий [1].

Промышленные сточные воды в зависимости от основного производственного процесса предприятия делятся на подгруппы [2], содержащие: минеральные компоненты (рудодобывающая, угледобывающая промышленность, машиностроительные и металлургические производства; промышленные предприятия, выпускающие минеральные удобрения и их компоненты, строительная индустрия и др.); органические соединения (пищевая, химическая промышленность, микробиологическая индустрия; предприятия, занимающиеся выпуском резинотехнических изделий, пластмасс и т.п.); органические соединения и минеральные компоненты (производства органического синтеза, нефтехимия, фармацевтика, нефтепереработка; пищевые производства (сахар, консервы и др.)).

Промышленные сточные воды разделяются [2]:

- по содержанию в них растворенных веществ: от 0,001 до 0,5; от 0,5 до 5,0; от 5 до 30 и более 30 кг/м³;
- физико-химическим свойствам для сточных вод, содержащих в своем составе органические полупродукты (например, классифицируемые по температуре кипения: менее 120, от 120 до 250 и более 250 °С);
- степени агрессивности: слабоагрессивные (слабокислые (рН = 6,0...6,5) и слабощелочные (рН = 8...9)); сильноагрессивные (сильнокислые (рН < 6), сильнощелочные (рН > 9)) и неагрессивные (рН = 7).

Сточные воды промышленных производств содержат коллоидные и взвешенные грубо-, мелкодисперсные примеси в различной концентрации, помимо растворимых неорганических и органических веществ [1].

Среди возможных путей снижения объема загрязненных сточных вод можно выделить следующие мероприятия [1]:

- 1) разработку и внедрение безводных технологических процессов;
- 2) усовершенствование и модернизацию существующих процессов;
- 3) разработка и внедрение современного высокотехнологического оборудования;
- 4) внедрение аппаратов воздушного охлаждения;
- 5) рецикл очищенных сточных вод в основной технологический процесс производства.

Применение современных многофункциональных и экологических методов очистки, разделения и утилизации технологических растворов и сточных вод обеспечивает рецикл ценных компонентов раствора в процессе производства. Методы мембранной технологии дифференцированно извлекают ионы из растворов и сточных вод при минимальных затратах энергии. Эффективное применение подобных методов требует проведения теоретических и экспериментальных исследований по структурным, кинетическим характеристикам полупроницаемых мембран, а также создание современного конструктивно-технологического оформления процессов с использованием мембранного оборудования.

Одним из производств, на котором образуются технологические растворы, требующие очистки и разделения, является синтез биотоплива.

Биодизельное топливо, представляющее собой смесь метиловых эфиров растительных масел и дизельного топлива в различном соотношении, предназначено для использования в дизельных двигателях мобильной техники и агрегатах энерго-, теплоснабжения для предприятий агропромышленного комплекса [3].

Синтез биотоплива из растительных масел сельскохозяйственных культур является перспективным направлением в целях использования возобновляемых источников энергии в агропромышленном комплексе. В качестве основного компонента для получения биодизельного топлива используются масла традиционных (пищевых) культур (подсолнечника, рапса, сои, льна, кукурузы) и нетрадици-

онных (непищевых) культур (микроводорослей, молочая, индау), а также отработанные некондиционные растительные масла [4]. Технологией получения биодизельного топлива из растительных масел и ее конструктивным оформлением на протяжении многих лет занимается ФГБНУ ВНИИТиН (Тамбов) [3, 5, 6].

Один из методов производства композитного моторного топлива – четырехстадийная технология переработки сырья растительного и органического происхождения, состоящая из подготовки сырья (растительного масла), получения высокомолекулярного компонента, низкомолекулярных синтетических сложных эфиров, смешения полученных компонентов [5].

На конечном этапе производственного цикла синтеза биотоплива осуществляется промывка системы, при которой образуется смесь промывочной воды и метилового эфира растительного масла [3].

Цель работы – проведение анализа и интерпретации структурных и кинетических характеристик полупроницаемых мембран в процессе микрофльтрационного разделения технологических растворов в производстве биотоплива и конструктивно-технологическое оформление процесса с использованием мембранной техники.

В качестве объектов экспериментальных исследований выбраны: микрофльтрационная мембрана типа МФФК-3 и технологический раствор, представляющий собой смесь метилового эфира растительного масла (Э-фаза) и воды, которая образуется в результате промывки оборудования в процессе синтеза биотоплива. Основные характеристики смеси: цвет – светло-молочно-коричневый, pH – 9,5; соотношение, % – 50:50 / 52:48.

Микрофльтрационная фторопластовая композиционная гидрофобная мембрана типа МФФК-3 представляет собой пористый пленочный материал на основе фторопласта Ф42Л на подложке из нетканых материалов (полипропилена, лавсана) [7]. Рабочие характеристики мембраны следующие: средний диаметр пор – 0,45 мкм; рабочее давление – 0,56 МПа; производительность J , $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ – 7500 (по этанолу, при $P = 0,05$ МПа); максимальная температура – 353 К; рабочий диапазон pH – 1...13.

Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования кинетики микрофльтрационного процесса разделения технологического раствора проводились на лабораторной установке [8 – 10] с плоскокамерной мембранной ячейкой (рис. 1), оснащенной двумя типами мембран [8, 9]. На *первом* этапе использовалась микрофльтрационная мембрана марки МФФК-3 и предварительный фильтр, при последующих экспериментах – МФФК-2Г и ММК-0,45.

Одной из основных кинетических характеристик процесса микрофльтрационного разделения является удельный выходной поток, который определялся по формуле [11, 12]

$$J = \frac{V_{\text{п}}}{F_{\text{м}} \tau}, \quad (1)$$

где $V_{\text{п}}$ – объем собранного пермеата, м^3 ; $F_{\text{м}}$ – рабочая площадь мембраны, м^2 ; τ – время проведения эксперимента, с.

Полученные образцы пермеата и ретентата после микрофльтрационного разделения исследовались на хроматографе «Кристалл-4000М», показавшем изменение компонентного состава.

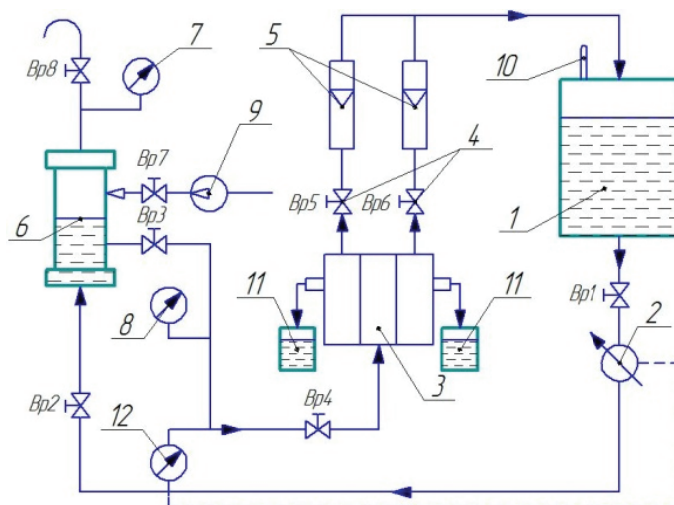


Рис. 1. Схема лабораторной микрофльтрационной установки:

1 – исходная емкость; 2 – дозировочный насос НД 100/63; 3 – плоскокамерная ячейка; 4 – вентиль; 5 – расходмеры; 6 – гидроаккумулятор; 7 – манометр; 8 – образцовый манометр; 9 – компрессор; 10 – термометр; 11 – накопительные емкости; 12 – электроконтактный манометр

После микрофльтрационного разделения смеси метилового эфира растительного масла (Э-фаза) и воды в различных пропорциях рабочие и исходные образцы мембран подвергались исследованию структуры методами электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и термогравиметрии.

Обсуждение результатов

На рисунке 2 представлены результаты экспериментальных исследований удельного выходного потока через микрофльтрационную мембрану МФФК-3 при разделении исследуемой смеси [13]. Зависимости показывают уменьшение удельного выходного потока пермеата в *первом* периоде (600...1200 с) при трансмембранном давлении 0,15 МПа, вероятно, связанное с частичным блокированием пор органическими соединениями исходного раствора.

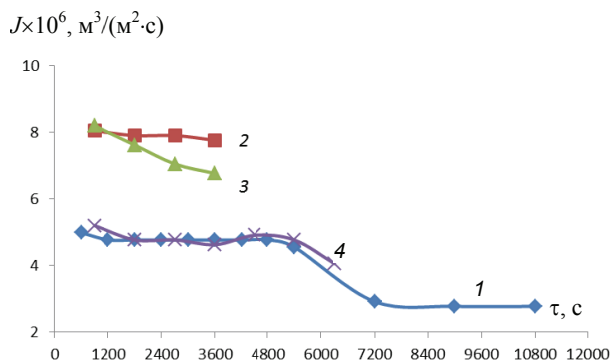


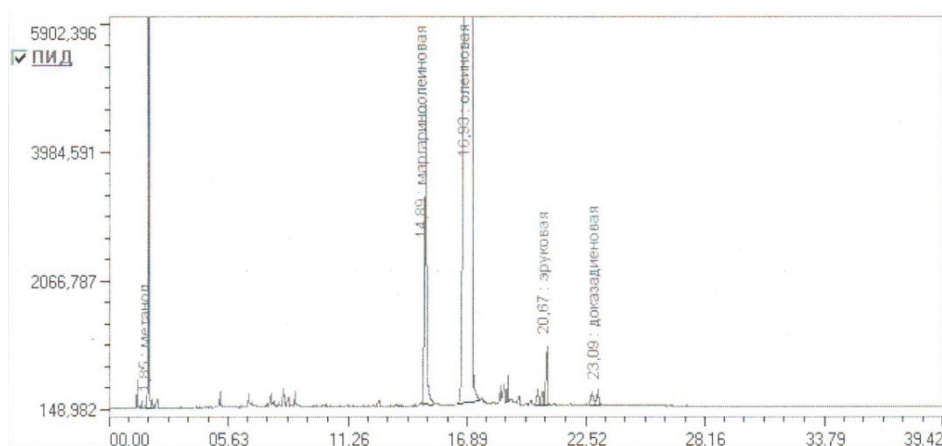
Рис. 2. Зависимости удельного выходного потока от времени проведения эксперимента и варьирования трансмембранного давления P , МПа:

1 – 0,15, 2 – 0,25, 3 – 0,35, 4 – 0,5

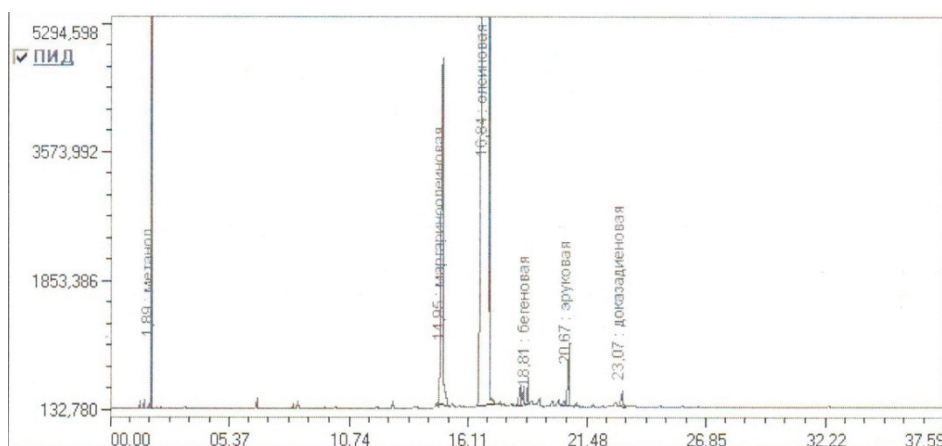
Во *второй* период (1200...5400 с), возможно, некоторые органические соединения (кислоты), находящиеся в исходном растворе, на поверхности мембраны создают примембранный гелевый слой, а оставшиеся движутся над ним. Предполагается, что над поверхностью мембраны формируется динамический гелевый слой, заканчивающийся уплотнением примембранного слоя в *третьем* периоде (5400...7200 с). Вероятно, с течением времени в исходном растворе эфира и кислот становится меньше за счет проникания их в пермеат, а воды – больше за счет концентрирования. *Четвертый* период (7200...10 800 с) является установившимся режимом.

Однако при увеличении трансмембранного давления удельный выходной поток растет, что связано с возрастанием движущей силы процесса баромембранного разделения. При дальнейшем увеличении трансмембранного давления удельный выходной поток на мембране снижается, что может быть связано с изменением концентрации ретентата, а также его кинематической вязкости и плотности в связи с прониканием в пермеат части воды.

Анализ хроматограмм (рис. 3) доказал эффективность баромембранного разделения [13], в процессе которого через микрофильтрационную мембрану

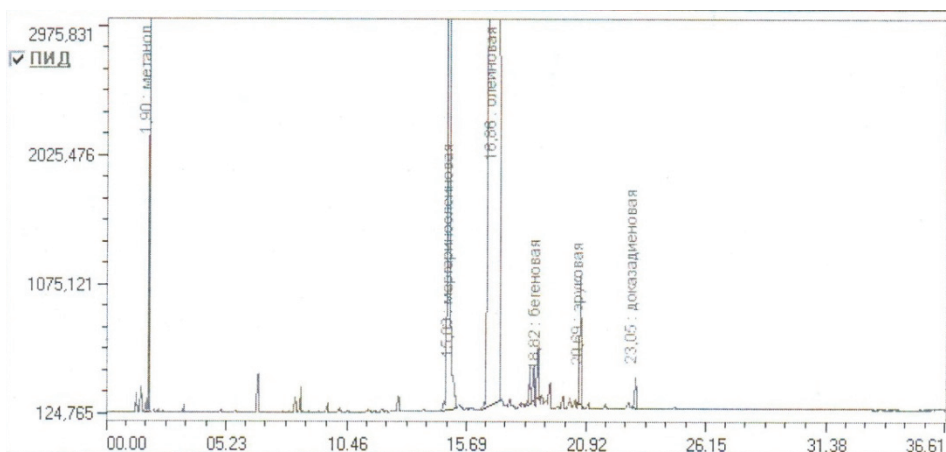


а)



б)

Рис. 3. Хроматограммы пермеата, полученного при трансмембранном давлении 0,15 МПа (а), 0,5 МПа (б), ретентата (в) (начало)



в)

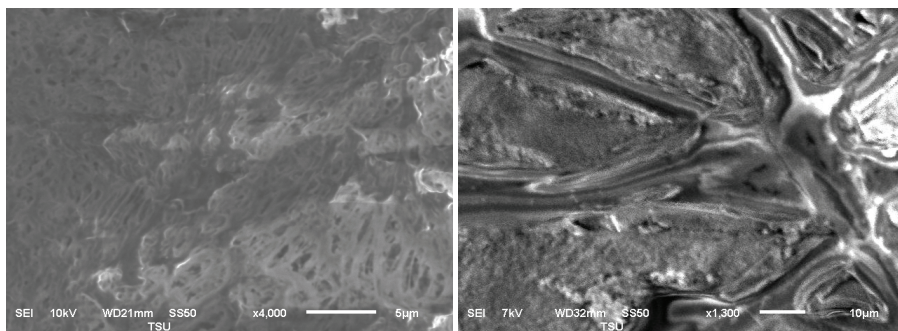
Рис. 3. Окончание

проходят метанол, маргариноолеиновая, олеиновая, бегеновая, уруковая, докозадиеновая кислоты, при этом на поверхности образуется частичный динамический гелевый слой, затормаживающий пропускание молекул воды.

Результаты проведенных исследований показали небольшое содержание воды в любой пробе, связанное с проскоком молекул в результате действия трансмембранного давления. Для полного отделения воды от Э-фазы необходимо вторично разделять полученный пермеат и поддерживать давление в баромембранной системе не менее 0,5 МПа. Минимального значения 0,05 % удалось достичь при отстаивании и декантировании верхнего слоя пермеата [13].

На рисунках 4, 5 представлены выборки электронных изображений исходных и рабочих образцов микрофильтрационной мембраны МФФК-3 и подложки при различном увеличении и многократной повторяемости эксперимента [13].

Анализ электронных изображений при различных увеличениях образцов (исходных и рабочих) микрофильтрационной мембраны МФФК-3, полученных до и после действия трансмембранного давления, показывает морфологические особенности, фиксируются остаточные гелевые сгустки, вероятно, продукт органических кислот, что подтверждается экспериментальными исследованиями кинетических характеристик, где с течением времени происходит снижение удельного выходного потока [13].



а)

б)

Рис. 4. Электронные изображения исходных образцов микрофильтрационной мембраны МФФК-3 при $\times 4000$ (а) и подложки при $\times 1300$ (б)

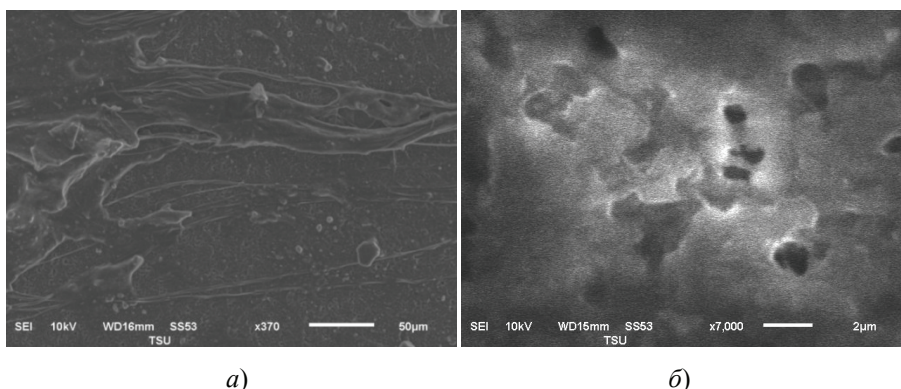


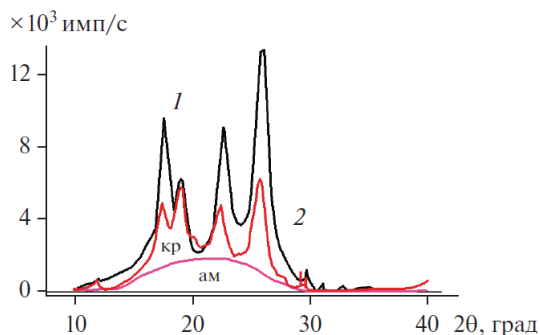
Рис. 5. Электронные изображения рабочих образцов микрофильтрационной мембраны МФФК-3 при $\times 370$ (а), $\times 7000$ (б)

При микрофильтрационном разделении активный слой мембраны может изменять свою структуру, что, вероятно, приведет к снижению или увеличению доли кристаллических или аморфных областей в активном слое и повлияет на производительность и качество разделения [14].

На дифрактограммах пленок мембраны МФФК-3 (исходного и рабочего образцов), представленных на рис. 6, отмечаются высокие пики, характерные для элементарной ячейки лавсана, согласно работам [15, 16], и малозаметные пики полипропиленовой матрицы [17, 18].

Падение общей пиковой интенсивности на дифрактограмме рабочего образца свидетельствует об эволюции кристаллографической текстуры. Результаты сравнительного анализа нормированных пиковых интенсивностей с суммой пиковых интенсивностей четырех основных рефлексов указывают на деформацию кристаллитов полимерной ПЭТФ матрицы в композитной пленке МФФК-3 от наложения трансмембранного давления при микрофильтрационном разделении водно-органического раствора.

Представленные результаты экспериментальных исследований структурных характеристик исходного образца мембраны МФФК-3 методом термогравиметрии (рис. 7) указывают на двухстадийный процесс термодеструкции, свидетельствующий о гетерогенной структуре образца, состоящей, согласно данным разработчика, из лавсана и полипропилена в отличие от рабочего образца, где происходит потеря массы в три этапа, вероятно, свидетельствующая о деструкции низкомолекулярных фракций лавсана, образующихся в результате разрыва макромолекул в аморфных межкристаллитных областях под действием трансмембранного



**Рис. 6. Рентгенограмма для пленки МФФК-3:
1 – исходная; 2 – рабочая**

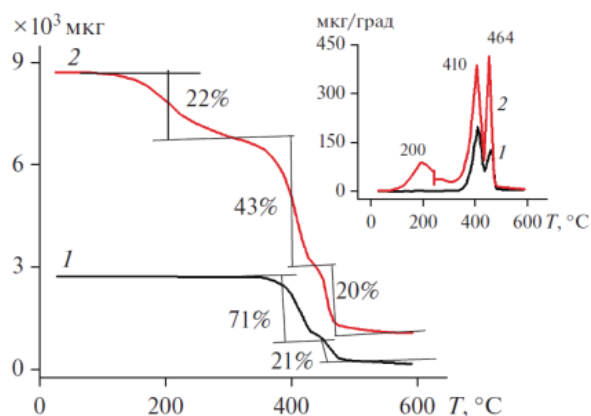


Рис. 7. Термограмма для пленки МФФК-3:
1 – исходная; 2 – рабочая

давления и высоких напряжений сдвига при диффузии эфирных масел [19 – 21]. При более высоких температурах происходит полная деструкция высокомолекулярных молекул лавсана и полипропилена.

Полученные результаты по изменению структуры образца рабочей пленки МФФК-3 на кривых термогравиметрии от действия трансмембранного давления и диффузии эфирных масел, вызывающие деструкцию (деполимеризацию) в основном молекул аморфной фазы дренажного слоя с незначительным уменьшением кристалличности полимерной матрицы, подтверждаются рентгеноструктурными исследованиями, методами дифференциально-сканирующей калориметрии [22, 23], а также ИК-спектроскопии [24].

На основании проведенных экспериментальных исследований кинетических и структурных характеристик микрофильтрационного разделения технологического раствора в производстве биотоплива и разработанного аппаратурного оформления мембранного процесса предложена модернизированная технологическая схема процесса синтеза биотоплива [25 – 27] на этапе микрофильтрационного разделения промывочной воды и возврата компонентов в производственный цикл (рис. 8). Описание подобного технологического процесса синтеза биотоплива подробно представлено в литературе [3, 5].

После режима промывки и предварительной очистки промывочная вода, содержащая смесь Э-фазы эфира растительного масла и воду из нейтрализатора 6, через электроклапаны 10 и 12, счетчик С7 при открытом шаровом кране К20 поступает, минуя счетчик С10 и электроклапан 15, с помощью дозирующего насоса Н9 при открытом шаровом кране К25 на микрофильтрационный аппарат 9, в котором происходит баромембранное разделение. Промывочная вода разделяется на два потока – пермеат и ретентат.

Пермеат после мембранной очистки далее накапливается в отстойнике 10, в случае прорыва Э-фазы через поры мембраны, выпадающей на дне, минуя электроклапаны 17 и 16, часть пермеата возвращается на повторное разделение. Очищенная вода насосом Н10 при открытом шаровом кране К27 из отстойника 10 возвращается в производственный процесс режима промывки. Часть полученного на микрофильтрационном аппарате 9 ретентата через электроклапаны 18 и 16 возвращается на повторное разделение, таким образом, при необходимости создается рецикл, другая часть (Э-фаза) через электроклапаны 19 и 20 насосом Н11 при открытом шаровом кране К28 через счетчик С11 возвращается в емкость предварительного смешивания 2 основного производственного цикла.

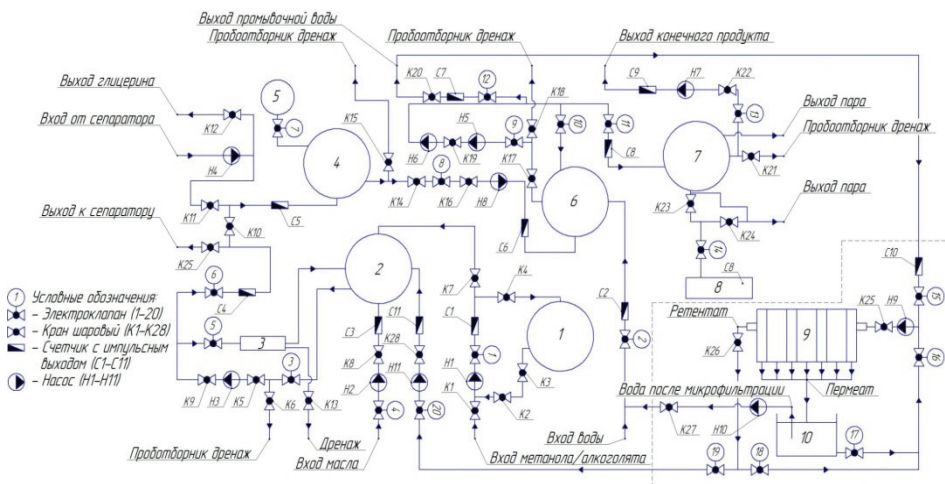


Рис. 8. Модернизированная технологическая схема процесса синтеза биотоплива [25] на этапе микрофилтративного разделения промывочной воды:

- 1 – емкость для спирта/алкоголята; 2 – емкость предварительного смешивания;
 3 – вихревой биореактор; 4, 6 – емкости нейтрализации; 5 – емкость ортофосфорной кислоты; 7 – емкость выпаривания; 8 – компрессор; 9 – микрофилтративный аппарат;
 10 – отстойник

Таким образом, модернизация технологической схемы процесса синтеза биотоплива на режиме промывки позволяет с помощью микрофилтрации разделить Э-фазу эфира растительного масла и очищенную воду и повторно использовать их в основном производственном цикле.

Заключение

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Получены кинетические зависимости микрофилтративного разделения технологического раствора в производстве биотоплива, показавшие способность отделить метиловый эфир растительного масла (Э-фазу) и воду.
2. Исследована различными методами структура поверхности исходного и рабочего образцов микрофилтративной мембраны и выявлены закономерности от действия трансмембранного давления и диффузии эфирных масел.
3. Разработка аппаратного оформления баромембранного процесса позволила провести модернизацию технологической схемы синтеза биотоплива на этапе промывки с возвратом компонентов раствора в производственный цикл.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Теоретические и экспериментальные исследования электрокинетических и структурных характеристик полимерных мембран посредством применения искусственных нейронных сетей в процессах электромембранной очистки промышленных растворов, содержащих ионы металлов» (FEMU-2024-0011).

Список литературы

1. Родионов, А. И. Техника защиты окружающей среды : учебник для вузов / А. И. Родионов, В. Н. Клушин, Н. С. Торочешников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Химия, 1989. – 512 с.

2. Очистка производственных сточных вод : учеб. пособие для вузов / С. В. Яковлев, Я. А. Карелин, Ю. М. Ласков, Ю. В. Воронов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1985. – 336 с.
3. Технология получения биодизельного топлива из растительных масел. – Тамбов : ГНУ ВИИТиН, 2008. – 31 с.
4. Бусин, И. В. Исследование параметров синтеза биотоплива под воздействием ультразвука / И. В. Бусин, Ю. В. Мещерякова // Вестник аграрной науки Дона. – 2021. – № 3(55). – С. 56–62.
5. Технология переработки сырья растительного и органического происхождения в моторное топливо. – Тамбов : ГНУ ВИИТиН, 2011. – 31 с.
6. Проект технологического процесса получения композитного биодизельного топлива с улучшенными эксплуатационными и экологическими свойствами. – Тамбов : ГНУ ВИИТиН, 2010. – 19 с.
7. Владипор: сайт ЗАО НТЦ Владипор. – URL : <http://www.vladipor.ru/catalog/show/> (дата обращения: 21.12.2025).
8. Абоносимов, О. А. Научные и практические основы электробаромембранной технологии в процессах химической водоподготовки и регенерации промышленных растворов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.03 / О. А. Абоносимов. – Тамбов, 2016. – 364 с.
9. Ковалев, С. В. Научные основы разработки и интенсификации электробаромембранных процессов очистки технологических растворов и стоков производств электрохимического синтеза и гальванопокрытий : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.03 / С. В. Ковалев. – Тамбов, 2015. – 510 с.
10. Лазарев, Д. С. Кинетические характеристики электронанофильтрационной очистки технологических растворов гальванических производств от ионов Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} / Д. С. Лазарев, И. В. Хорохорина // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2025. – Т. 31, № 1. – С. 118 – 128. doi: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.118-128
11. Дытнерский, Ю. И. Обратный осмос и ультрафильтрация / Ю. И. Дытнерский. – Москва : Химия, 1978. – 352 с.
12. Свитцов, А. А. Введение в мембранную технологию / А. А. Свитцов. – Москва : ДеЛиПринт, 2007 – 208 с.
13. Влияние трансмембранного давления на морфологию поверхности и кинетические характеристики пористых пленок МФФК-3 и ПП-190 / С. И. Лазарев, С. А. Нагорнов, С. В. Ковалев, Д. Н. Коновалов, А. Ю. Корнев // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2022. – № 1. – С. 86–95. doi: 10.31857/S1028096022010095
14. Конформационные изменения структурных характеристик полимерных пленок МФФК-3 и ПП-190 в процессе очистки водно-органических растворов / С. И. Лазарев, Ю. М. Головин, Д. Н. Коновалов, С. И. Котенев, Э. Ю. Яновская, С. В. Ковалев // Журнал физической химии. – 2022. – Т. 96, № 10. – С. 1481–1489. doi: 10.31857/S0044453722100144
15. Bellare, A. Development of texture in poly(ethylene terephthalate) by plane-strain compression / A. Bellare, R. E. Cohen, A. S. Argon // Polymer. – 1993. – Vol. 34, No. 7. – P. 1393–1403. doi: 10.1016/0032-3861(93)90851-Z
16. Разработка новых материалов на основе полисульфидных олигомеров, модифицированных полифторированными соединениями. Сообщение 2. Влияние полифторированных добавок на свойства наполненных вулканизатов полисуль-

фидных олигомеров / И. А. Новаков, Н. А. Рахимова, А. В. Нистратов, С. В. Кудашев, С. Ю. Гугина // Известия ВолгГТУ. – 2011. – № 2(75). – С. 121–127.

17. Da Costa, H. M. Degradation of polypropylene (PP) during multiple extrusions: Thermal analysis, mechanical properties and analysis of variance / H. M. Da Costa, V. D. Ramos, M. G. de Oliveira // Polymer Testing. – 2007. – Vol. 26, No. 5. – P. 676–684. doi: 10.1016/j.polymeresting.2007.04.003

18. Favaro, M. M. A X-ray study of β -phase and molecular orientation in nucleated and non-nucleated injection molded polypropylene resins / M. M. Favaro, M. C. Branciforti, R. E. S. Bretas // Materials Research. – 2009. – Vol. 12, No. 4. – P. 455–464. doi: 10.1590/S1516-14392009000400014

19. Pompe, G. Analysis of the influence of the polymerisation degree on the thermal properties of irradiation-modified poly(tetrafluoroethylene) / G. Pompe, U. Lappan, L. Häußler // Thermochemica Acta. – 2002. – Vol. 391, No. 1. – P. 257–269. doi: 10.1016/S0040-6031(02)00188-0

20. Hinsken, H. Degradation of Polyolefins During Melt Processing / H. Hinsken, S. Moss, J. Pauqueta, H. Zweifel // Polymer Degradation and Stability. – 1991. – Vol. 34. – P. 279–293. doi: 10.1016/0141-3910(91)90123-9

21. Цвайфель, Х. Добавки к полимерам : справочник / Х. Цвайфель, Р. Д. Маер, М. Шиллер ; пер. англ. 6-го изд. (Plastics Additives Handbook) под ред. В. Б. Узденского, А. О. Григорова. – Санкт-Петербург : Профессия, 2010. – 1144 с.

22. Влияние трансмембранного давления и диффузии эфирных субстанций на трансформацию структуры в полимерных пленках вида УПМ-100 и ПП-190 / С. И. Лазарев, Ю. М. Головин, С. В. Ковалев, Д. Н. Коновалов, С. И. Котенев // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2022. – Т. 58, № 4. – С. 421–427. doi: 10.31857/S0044185622020127

23. Thermal, X-ray Diffraction, and Kinetic Characteristics of Filtration Films in the Study of Ethereal Substances / S. I. Lazarev, Yu. M. Golovin, S. V. Kovalev, D. N. Kononov, S. I. Kotenev // High Temperature. – 2023. – Vol. 60, No. 4. – P. 485–491. doi: 10.1134/S0018151X22030014

24. ИК-спектроскопические исследования адсорбированной воды и изменения структуры в гидрофобных и гидрофильных микрофильтрационных мембранах / С. И. Лазарев, Ю. М. Головин, Д. Н. Коновалов, Э. Ю. Яновская, Д. А. Родионов // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2023. – Т. 59, № 2. – С. 155–160. doi: 10.31857/S0044185623700183

25. Романцова, С. В. Прогнозирование цетанового числа биодизельного топлива, полученного на вихревом реакторе, по составу метиловых эфиров жирных кислот / С. В. Романцова, С. А. Нагорнов, А. Ю. Корнев // Наука в центральной России. – 2019. – № 6(42). – С. 76–83. doi: 10.35887/2305-2538-2019-6-76-83

26. Аппаратурно-технологическое оформление электродиализной очистки сточных вод производства печатных плат / М. С. Гессен, К. В. Шестаков, С. И. Лазарев, О. В. Долгова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2025. – Т. 31, № 3. – С. 474–481. doi: 10.17277/vestnik.2025.03.pp.474-481

27. Нагорнов, С. А. Оптимальное управление процессом переэтерификации жиров растительного и животного происхождения / С. А. Нагорнов, А. Ю. Корнев, С. В. Романцова // Наука в центральной России. – 2020. – № 4 (46). – С. 98–106. doi: 10.35887/2305-2538-2020-4-98-106

Analysis and Interpretation of Kinetic and Structural Characteristics of Microfiltration Separation of Process Solutions in Biofuel Production

© D. N. Konovalov¹, S. I. Lazarev², S. A. Nagornov³

¹ *Department Engineering and Technology of Automobile Transport, kdn1979dom@mail.ru; TSTU, Tambov, Russian Federation;*

² *Department Mechanics and Engineering Graphics, TSTU, Tambov, Russian Federation;*

³ *Motor Fuel Use Laboratory, All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, Tambov, Russian Federation*

Keywords: kinetic characteristics; membrane; microfiltration; separation; structure; Specific output flux.

Abstract: The kinetic and structural characteristics of the microfiltration separation of process solutions in biofuel production were analyzed and interpreted, demonstrating the efficiency of membrane separation of aqueous-organic solutions. Chromatograms, diffraction patterns, thermograms, and electron images of the MFFK-3 microfiltration membrane were experimentally obtained using physical methods, reflecting the effects of transmembrane pressure and essential oil diffusion. Based on the obtained experimental data and the developed instrumentation for the baromembrane process, the biofuel synthesis process flowsheet was modernized, allowing for the return of wash water components to the production cycle.

References

1. Rodionov A.I., Klushin V.N., Torocheshnikov N.S. *Tekhnika zashchity okruzhayushchey sredy: uchebnik dlya vuzov* [Environmental Protection Engineering], Moscow: Khimiya, 1989, 512 p. (In Russ.)
2. Yakovlev S.V., Karelin Ya.A., Laskov Yu.M., Voronov Yu.V. *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Industrial Wastewater Treatment], Moscow: Stroyizdat, 1985, 336 p. (In Russ.)
3. *Tekhnologiya polucheniya biodizelnogo topliva iz rastitelnykh masel* [Technology of Biodiesel Fuel Production from Vegetable Oils], Tambov: GNU VIITiN, 2009, 31 p. (In Russ.)
4. Busin I.V., Meshcheryakova Yu.V. [Study of the parameters of biofuel synthesis under the influence of ultrasound], *Vestnik agrarnoy nauki Dona* [Bulletin of agrarian science of the Don], 2021, no. 3(55), pp. 56-62. (In Russ., abstract in Eng.)
5. *Tekhnologiya pererabotki syr'ya rastitel'nogo i organicheskogo proiskhozhdeniya v motornoye toplivo* [Technology of processing raw materials of plant and organic origin into motor fuel], Tambov: GNU VIITiN, 2011, 31 p. (In Russ.)
6. *Proyekt tekhnologicheskogo protsessa polucheniya kompozitnogo biodizelnogo topliva s uluchshennymi ekspluatatsionnymi i ekologicheskimi svoystvami* [Project of the technological process for producing composite biodiesel fuel with improved operational and environmental properties], Tambov: GNU VNIITiN, 2010, 19 p. (In Russ.)
7. Available at: <http://www.vladipor.ru/catalog/show/> (accessed 21 December 2025).

8. Abonosimov O.A. *PhD of Doctor's thesis (Engineering)*, Tambov, 2016, 364 p. (In Russ.)
9. Kovalev S.V. *PhD of Doctor's thesis (Engineering)*, Tambov, 2015, 510 p. (In Russ.)
10. Lazarev D.S., Horokhorina I.V. [Kinetic characteristics of electronanofiltration purification of process solutions of galvanic production from ions Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+}], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2025, vol. 31, no. 1, pp. 118-128. doi: 10.17277/vestnik.2025.01.pp.118-128 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Dytnerskiy Yu.I. *Obratnyy osmos i ul'trafil'tratsiya* [Reverse Osmosis and Ultrafiltration], Moscow: Khimiya, 1978, 352 p. (In Russ.)
12. Svittsov A.A. *Vvedeniye v membrannuyu tekhnologiyu* [Introduction to Membrane Technology], Moscow: DeLiprint, 2007, 208 p. (In Russ.)
13. Lazarev S.I., Nagornov S.A., Kovalev S.V., Konovalov D.N., Kornev A.Yu. [Effect of Transmembrane Pressure on Surface Morphology and Kinetic Characteristics of Porous Films MFFK-3 and PP-190], *Poverkhnost'. Rentgenovskkiye, sinkhrotronnyye i neytronnyye issledovaniya* [Surface. X-ray, Synchrotron, and Neutron Studies], 2022, no. 1, pp. 86-95. doi: 10.31857/S1028096022010095 (In Russ., abstract in Eng.)
14. Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Konovalov D.N., Kotenev S.I., Yanovskaya E.Yu., Kovalev S.V. [Conformational Changes in the Structural Characteristics of MFFK-3 and PP-190 Polymer Films during the Purification of Aqueous-Organic Solutions], *Zhurnal fizicheskoy khimii* [Russian Journal of Physical Chemistry], 2022, vol. 96, no. 10, pp. 1481-1489. doi: 10.31857/S0044453722100144 (In Russ., abstract in Eng.)
15. Bellare A., Cohen R.E., Argon A.S. Development of texture in poly(ethylene terephthalate) by plane-strain compression, *Polymer*, 1993, vol. 34, no. 7, pp. 1393-1403. doi: 10.1016/0032-3861(93)90851-Z
16. Novakov I.A., Rakhimova N.A., Nistratov A.V., Kudashev S.V., Gugina S.Yu. [Development of new materials based on polysulfide oligomers modified with polyfluorinated compounds. Message 2. Influence of polyfluorinated additives on the properties of filled vulcanizates of polysulfide oligomers], *Izvestiya VolgGTU* [Bulletin of VolGTU], 2011, no. 2(75), pp. 121-127. (In Russ., abstract in Eng.)
17. Da Costa H.M., Ramos V.D., de Oliveira M.G. Degradation of polypropylene (PP) during multiple extrusions: Thermal analysis, mechanical properties and analysis of variance, *Polymer Testing*, 2007, vol. 26, no. 5, pp. 676-684. doi: 10.1016/j.polymertesting.2007.04.003
18. Favaro M.M., Branciforti M.C., Bretas R.E.S. A X-ray study of β -phase and molecular orientation in nucleated and non-nucleated injection molded polypropylene resins, *Materials Research*, 2009, vol. 12, no. 4, pp. 455-464. doi: 10.1590/S1516-14392009000400014
19. Pompe G., Lappan U., Häußler L. Analysis of the influence of the polymerisation degree on the thermal properties of irradiation-modified poly(tetrafluoroethylene), *Thermochemica Acta*, 2002, vol. 391, no. 1, pp. 257-269. doi: 10.1016/S0040-6031(02)00188-0
20. Hinsken H., Moss S., Pauqueta J., Zweifel H. Degradation of Polyolefins During Melt Processing, *Polymer Degradation and Stability*, 1991, vol. 34, pp. 279-293. doi: 10.1016/0141-3910(91)90123-9
21. Tsvayfel' Kh., Mayer R.D., Shiller M. *Plastics Additives Handbook*, St. Petersburg: Professiya, 2010, 1144 p. (In Russ.)

22. Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Kovalev S.V., Konovalov D.N., Kotenev S.I. [The Effect of Transmembrane Pressure and Diffusion of Ester Substances on Structural Transformation in Polymer Films of the UPM-100 and PP-190 Types], *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov* [Surface Physicochemistry and Material Protection], 2022, vol. 58, no. 4, pp. 421-427. doi: 10.31857/S0044185622020127 (In Russ., abstract in Eng.)

23. Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Kovalev S.V., Konovalov D.N., Kotenev S.I. Thermal, X-ray Diffraction, and Kinetic Characteristics of Filtration Films in the Study of Ethereal Substances, *High Temperature*, 2023, vol. 60, no. 4, pp. 485-491. doi: 10.1134/S0018151X22030014

24. Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Konovalov D.N., Yanovskaya E.Yu., Rodionov D.A. [IR spectroscopic studies of adsorbed water and structural changes in hydrophobic and hydrophilic microfiltration membranes], *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov* [Surface Physicochemistry and Material Protection], 2023, vol. 59, no. 2, pp. 155-160. doi: 10.31857/S0044185623700183 (In Russ., abstract in Eng.)

25. Romantsova S.V., Nagornov S.A., Kornev A.Yu. [Forecasting the cetane number of biodiesel fuel obtained in a vortex reactor based on the composition of fatty acid methyl esters], *Nauka v tsentral'noy Rossii* [Science in Central Russia], 2019, no. 6(42), pp. 76-83. doi: 10.35887/2305-2538-2019-6-76-83 (In Russ., abstract in Eng.)

26. Gessen M.S., Shestakov K.V., Lazarev S.I., Dolgova O.V. [Apparatus and technological design of electro dialysis wastewater treatment of printed circuit board production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2025, vol. 31, no. 3, pp. 474-481. doi: 10.17277/vestnik.2025.03.pp.474-481 (In Russ., abstract in Eng.)

27. Nagornov S.A., Kornev A.Yu., Romantsova S.V. [Optimal control of the transesterification process of vegetable and animal fats], *Nauka v tsentral'noy Rossii* [Science in Central Russia], 2020, no. 4 (46), pp. 98-106. doi: 10.35887/2305-2538-2020-4-98-106 (In Russ., abstract in Eng.)

Analyse und Interpretation der kinetischen und strukturellen Eigenschaften der Mikrofiltrationstrennung von Prozesslösungen in der Biokraftstoffproduktion

Zusammenfassung: Die kinetischen und strukturellen Eigenschaften der Mikrofiltrationstrennung von Prozesslösungen in der Biokraftstoffproduktion sind analysiert und interpretiert. Dabei ist die Effizienz der Membrantrennung wässrig-organischer Lösungen demonstriert. Chromatogramme, Beugungsmuster, Thermogramme und Elektronenmikroskopaufnahmen der MFFK-3-Mikrofiltrationsmembran sind experimentell mittels physikalischer Methoden gewonnen, um die Auswirkungen des Transmembrandrucks und der Diffusion ätherischer Öle zu messen. Basierend auf den gewonnenen experimentellen Daten und der entwickelten Instrumentierung für das Baromembranverfahren ist das Fließschema der Biokraftstoffsynthese modernisiert, wodurch die Rückführung von Waschwasserkomponenten in den Produktionskreislauf ermöglicht wird.

Analyse et interprétation des caractéristiques cinétiques et structurelles de la séparation par microfiltration des solutions technologiques dans la production de biocarburants

Résumé: Sont analysées les caractéristiques cinétiques et structurelles du processus de la séparation de la microfiltration des solutions technologiques dans la production de biocarburants, montrant l'efficacité du processus de la séparation membranaire de la solution aqueuse-organique. Sont obtenus des chromatogrammes, des diffractogrammes, des thermogrammes et des images électroniques de la membrane de microfiltration MFFK-3 par des méthodes physiques à partir de l'action de la pression transmembranaire et de la diffusion d'huiles essentielles. A la base des données expérimentales obtenues et de la conception matérielle du procédé baromembranaire, est modernisé le schéma technique de la synthèse des biocarburants pour permettre le retour des composants de l'eau de lavage dans le cycle de production.

Авторы: *Коновалов Дмитрий Николаевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии автомобильного транспорта»; *Лазарев Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация; *Нагорнов Станислав Александрович* – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории использования моторного топлива, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Тамбов, Российская Федерация.