

В. О. Дряхлов, М. Г. Ахмадиев, М. Ю. Алексеева,
И. Г. Шайхиев, М. Ф. Галиханов

РАЗДЕЛЕНИЕ ЭМУЛЬСИИ УГЛЕВОДОРОДОВ ПОЛИСУЛЬФОНАМИДНЫМИ МЕМБРАНАМИ, ОБРАБОТАННЫМИ КОРОННЫМ РАЗРЯДОМ

Ключевые слова: Водомасляные и водонефтяные эмульсии, полисульфонамидная мембрана, коронный разряд, математическое моделирование, метод Лагранжа.

Образующиеся в результате производственной деятельности эмульсии углеводородов как правило, отличаются высокой кинетической и термодинамической стабильностью и тяжело поддаются разрушению и очистке при использовании традиционных методов водоочистки. Одним из методов для разделения водомасляных и водонефтяных эмульсий является мембранный способ, который заключается в селективном отделении жидкости от частиц эмульсии посредством прохождения потока воды через пористую перегородку. В настоящей работе исследовалось разделение модельных 1%, 3% и 5%-ных водомасляных эмульсий на основе масла марки «И-20А», стабилизированных ПАВ марки «Косинтол-242» в количестве 0,1%, 0,3% и 0,5%, соответственно (количество дистilledированной воды – 98,1%, 96,7% и 94,5%, соответственно), а также 1% водонефтяная эмульсия на основе нефти девонского отложений Тумутукского месторождения, Республика Татарстан, стабилизированная 0,1%-ным раствором ПАВ марки «Косинтол-242». В качестве фильтрующего элемента использовались полисульфонамидные мембранны с размерами пор 0,002, 0,005 и 0,010 мкм (масса отсекаемых частиц – 20, 50 и 100 кДа, соответственно). Исследуемые мембранны модифицировались обработкой коронным разрядом при напряжении (U) - 5, 15, 25 и 35 кВ и времени обработки (τ) - 1, 3 и 5 мин. Приведены графики изменения производительности мембранны в зависимости от времени процесса и режимов коронообработки. Проведено моделирование процесса с использованием аппарата интерполяции функций методом Лагранжа. Показана высокая сходимость экспериментальных и расчетных данных с высоким коэффициентом аппроксимации.

V. O. Dryakhlov, M. G. Akhmadiev, M. Yu. Alekseeva,
I. G. Shaikhiev, M. F. Galikhanov

SEPARATION OF HYDROCARBON EMULSIONS BY POLYSULFONAMIDE MEMBRANES TREATED WITH CORONA DISCHARGE

Keywords: water-oil and water-petroleum emulsions, polysulfonamide membrane, corona discharge, mathematical modeling, Lagrange method.

Hydrocarbon emulsions formed as a result of industrial activity are usually characterized by high kinetic and thermodynamic stability and are difficult to destroy and purify using traditional water purification methods. One of the methods for separating water-oil and water-oil emulsions is the membrane method, which consists in selective separation of liquid from emulsion particles by passing a water flow through a porous partition. In the present work, we investigated the separation of model 1%, 3% and 5% water-oil emulsions based on I-20A oil stabilized with 0.1%, 0.3% and 0.5% Kosintol-242 surfactant, respectively (the amount of distilled water was 98.1%, 96.7% and 94.5%, respectively), as well as a 1% water-oil emulsion based on Devonian oil from the Tumutuk field, Republic of Tatarstan, stabilized with a 0.1% solution of Kosintol-242 surfactant. Polysulfonamide membranes with pore sizes of 0.002, 0.005 and 0.010 μm (mass of cut-off particles is 20, 50 and 100 kDa, respectively) were used as a filter element. The studied membranes were modified by corona discharge treatment at a voltage (U) of 5, 15, 25 and 35 kV and treatment time (τ) of 1, 3 and 5 min. Graphs of membrane productivity change depending on the process time and corona treatment modes are given. The process was simulated using the Lagrange function interpolation apparatus. High convergence of experimental and calculated data with a high approximation coefficient is shown.

Введение

С развитием объемов промышленного производства, все острее становится проблема очистки увеличивающихся сточных вод и попадание различных поллютантов в природные водоисточники. Накопление в поверхностных источниках воды токсичных химических веществ представляют особую опасность для всей экосистемы и здоровья человека, в частности. Особую проблему представляют сточные воды (СВ), содержащие эмульгированные нефть и нефтепродукты, которые образуются практически на всех промышленных предприятиях. Данные эмульсии характеризуются высокой кинетической и термодинамической стабильностью, тяжело поддаются разрушению и очистке. Поэтому, разработка эффективных,

экологичных и экономичных методов очистки СВ, содержащих нефть и продукты ее переработки, является крайне востребованной, но все еще сложной производственной задачей. Несмотря на то, что существуют различные традиционные методы очистки нефтесодержащих СВ, такие как, гравитационное разделение, ультразвуковое разделение, электрокоагуляция, окисление, они, в основном, применяются для разрушения нестабильных эмульсий и не решают существующую проблему [1].

Для решения данной задачи, перспективным является мембранный метод, основанный на селективном отделении жидкости от частиц эмульсии посредством прохождения потока воды через пористую перегородку. Как и все методы, мембранный метод имеет ряд преимуществ и недостатков. К преимуществам

относятся: низкое энергопотребление отсутствие реактивов, возможность масштабирования, низкие эксплуатационные расходы, высокая селективность по разделяемым компонентам, возможность возврата пермеата для повторного использования и т.д. К одним из существенных недостатков можно отнести образование необратимого слоя загрязнения поверхности мембран, которое возникает в процессе фильтрации из-за взаимодействия между загрязняющими веществами и материалом мембранны [2].

Среди многообразия мембран, важное место занимают полимерные мембранны, в основе которых лежат различные полимеры: полизэфирсульфон, поликарбонат, полисульфонамид, поливинилхлорид, полипропилен и т.д. [3]. Однако большинство мембран не соответствуют требованиям технологических процессов и поэтому целесообразным является их предварительная модификация [4], которая позволяет направленно изменять транспортные характеристики, гидрофобно-гидрофильтрный баланс и заряд поверхности мембранны, увеличивать устойчивость к загрязнению в процессе эксплуатации, механическую прочность, хемо- и термостойкость, придавать мемbrane дополнительные функции, чувствительность к pH [5-7].

Широкое распространение для решения этой цели получил метод обработки мембран в поле униполярного коронного разряда, который позволяет применять их в различных отраслях промышленности [8-12]. В продолжение ранее проведенных работ [13-16], нами исследовалось разделение эмульсий углеводородов полисульфонамидными (ПСА) мембранными, обработанными в поле униполярного коронного разряда. Как показывает опыт предыдущих исследований, экспериментальная часть занимает довольно большую часть исследовательской работы, а полученные данные не всегда бывают адекватны.

Решение подобных задач можно решить, используя математическое моделирование, которое предполагает описание исследуемых явлений, процессов, систем различной физической природы языком математических соотношений. Относительно мембранны проводится описание и анализ массопереноса переноса и прогнозирования его поведения. Эти модели могут включать в себя, как уравнения - Фика для диффузии, уравнения Навье-Стокса для конвекции и уравнения Нернста-Планка для миграции заряженных молекул для описания конкретных случаев мембранных процессов, так и общие модели с интерполяцией по Лагранжу [17-19].

Принципы и понятия математического моделирования в последнее время получили существенное развитие. Оно связано с интенсивным применением информационных технологий и вычислительной техники. Использование математических моделей при расчёте процессов и аппаратов химических технологий дает возможность значительно сократить время от исследования процесса до его внедрения в промышленность. Математическое описание каждого процесса задаётся некоторыми формулами, системой алгебраических (линейных и нелинейных) или дифференциальных уравнений, отражающих взаимное влияние различных параметров.

Получение соотношений для выходных параметров в явном аналитическом виде непосредственно из уравнений математического описания удается лишь в редких случаях. Вследствие этого, для нахождения вида указанных зависимостей необходимо иметь определенный алгоритм решения задачи, описывающий исследуемый процесс, применение которого для любой совокупности значений входных и управляющих параметров, позволяет рассчитать параметры состояния. Математическая модель представляет собой систему уравнений математического описания, отражающую сущность явлений, протекающих в объекте моделирования, и позволяющую с помощью определенного алгоритма прогнозировать поведение объекта при изменении входных и управляющих параметров.

Для успешного использования математической модели необходимо, чтобы модель достаточно верно описывала качественно и количественно свойства объекта моделирования. Для проверки адекватности математической модели реальному процессу нужно сравнить результаты измерения на процессе с результатами предсказания модели в идентичных условиях (при определенных значениях входных и управляющих параметров) и подстроить параметры математического описания объекта. Такая проверка позволяет оценить точность математической модели и, следовательно, возможность её применения для решения различных задач.

На практике же приходится считаться с тем, что никакая модель не может полностью заменить моделируемый объект, и мириться с необходимостью применения моделей, которые лишь с тем или иным приближением предсказывают поведение реального объекта.

В данной работе при математической обработке экспериментальных данных использовался аппарат интерполяции функций. Кратко приводим основные сведения из теории интерполяции [17-19].

Интерполяирование функции используется:

1. Для замены сложно вычисляемой функции другой, вычисляемой проще;
2. Для приближенного восстановления функции на всей области задания по значениям её в отдельных точках или по другим известным величинам;
3. Для получения сглаживающих функций;
4. Для приближенного нахождения предельных значений функции;
5. В задачах ускорения сходимости последовательностей и рядов и в других вопросах.

При изучении различных физических явлений и проведении технологических экспериментов часто наблюдается функциональная зависимость между величинами, описывающими количественную сторону данного явления или эксперимента. Результаты этих экспериментов обычно представляются графически, т.е. в виде некоторых линий, указывающих связь между этими величинами.

Экспериментальная часть

В настоящей работе представлены исследования разделения водомасляной (ВМЭ) и водонефтяной

(ВНЭ) эмульсий ПСА мембранными. В качестве основных показателей разделения эмульсий рассматривались производительность и эффективность процесса. Последняя определяется по изменению значений ХПК эмульсии до и после процесса разделения, характеризующее общее содержание органических веществ в разделяемой смеси в ходе ультрафильтрации. Производительность рассчитывалась как отношение объема прошедшей через мембрану смеси к произведению времени и площади поверхности мембранны.

Модельная ВМЭ готовилась на основе масла марки «И-20А» в количестве 1 %, 3 % и 5 % и ПАВ марки «Косинтол-242» в количестве 0,1 %, 0,3 % и 0,5 %, соответственно (количество дистиллированной воды – 98,1 %, 96,7 % и 94,5 %, соответственно). В качестве фильтрующего элемента использовались ПСА мембранны с размерами пор 0,002, 0,005 и 0,010 мкм (масса отсекаемых частиц - 20, 50 и 100 кДа, соответственно), диаметр мембранны составляет 47 мм.

ВНЭ приготовлена на основе нефти девонского отложения Тумутукского месторождения Республики Татарстан в количестве 1 % и 0,1 % ПАВ марки «Косинтол-242» в качестве стабилизатора, дисперсионная среда – дистиллированная вода.

Эксперимент проводился в режиме «cross-flow» на лабораторной мембранный установке, объемом 200 см³, в которую наливалось 100 см³ разделяемой эмульсии. В нижней части аппарата устанавливалась мембрана. В верхнюю часть установки подавалось давление от 2 до 4 атм., создаваемое компрессором. Во избежание забивания пор мембранны, с помощью магнитной мешалки над мембранный создавался тангенциальный поток эмульсии.

Коронообработка мембранных фильтров осуществлялась в поле униполярного коронного разряда при следующих параметрах: напряжение (U) - 5, 15, 25 и 35 кВ и время обработки (τ) - 1, 3 и 5 мин.

Для описания процесса ультрафильтрации водомасляной эмульсии коронообработанными ПСА мембранными в настоящей работе применяется математический аппарат теории интерполирования функций. В частности, на основании нижеприведенных экспериментальных данных с помощью интерполяционных полиномов Лагранжа строились модели, описывающие исследуемый процесс. Это позволит, не проводя множество однотипных экспериментов, получить технологические параметры процесса в зависимости от исходных данных. Применение аппарата аппроксимации по Лагранжу является эффективным инструментом при моделировании технологических процессов с высокой точностью.

Кратко суть метода заключается в следующем. Пусть на основании эксперимента значениям $x_1 \dots x_n$ соответствуют значения $y_1 \dots y_n$. Необходимо установить, по возможности, более простую зависимость между этими величинами. С этой целью определя-

ется полином $L_n(x)$ степени не выше $n-1$, приближенно выражющий эту зависимость. В качестве такого полинома берется интерполяционный полином Лагранжа, который при значениях $x_1 \dots x_n$ принимает значения $y_1 \dots y_n$. Этот полином является аналитическим выражением, описывающим зависимость между величинами и записывается в виде

$$L_n(x) = \sum_{i=1}^n f(x_i)Q_i(x), \text{ где } Q_i(x) = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{x-x_j} \frac{x-x_j}{x_i-x_j}, \text{ причем } Q_i(x_j) = 0 \text{ при } i \neq j, Q_i(x_j) = 1 \text{ при } i=j,$$

Обсуждение результатов

На рис. 1 представлены графики зависимости производительности разделения 1, 3, 5 % ВМЭ ПСА с размерами пор мембран 0,002, 0,005 и 0,010 мкм, где показано ожидаемое повышение значения производительности с уменьшением концентрации ВМЭ.

Приведем построенные нами аналитические выражения, описывающие изменение значений производительности в зависимости от времени (t) при различном значении размера пор мембран и концентрации ВМЭ.

ПСА мембрана с размером пор 0,002 мкм:

$$Q_{1\%} = 9 \cdot 10^{-8}t^5 - 2 \cdot 10^{-5}t^4 + 0,0025t^3 - 0,111t^2 + 2,0718t + 0,0701 \quad R^2 = 0,9844$$

$$Q_{3\%} = -3 \cdot 10^{-6}t^4 + 0,0007t^3 - 0,0532t^2 + 1,3249t + 0,0824 \quad R^2 = 0,9850$$

$$Q_{5\%} = -0,0009t^2 + 0,1147t - 0,0032 \quad R^2 = 0,9970$$

ПСА мембрана с размером пор 0,005 мкм:

$$Q_{1\%} = -5 \cdot 10^{-6}t^4 + 0,0012t^3 - 0,0827t^2 + 2,0904t + 0,3529 \quad R^2 = 0,9748$$

$$Q_{3\%} = -2 \cdot 10^{-6}t^4 + 0,0004t^3 - 0,0324t^2 + 0,9726t + 0,0073 \quad R^2 = 0,9992$$

$$Q_{5\%} = 8 \cdot 10^{-7}t^4 - 0,0001t^3 + 0,0054t^2 + 0,0453t - 0,0087 \quad R^2 = 0,9905$$

ПСА мембрана с размером пор 0,010 мкм:

$$Q_{1\%} = -5 \cdot 10^{-6}t^4 + 0,0012t^3 - 0,0829t^2 + 2,1016t + 0,1272 \quad R^2 = 0,9717$$

$$Q_{3\%} = 1 \cdot 10^{-7}t^5 - 3 \cdot 10^{-5}t^4 + 0,0025t^3 - 0,1111t^2 + 1,9819t + 0,0086 \quad R^2 = 0,9970$$

$$Q_{5\%} = 2 \cdot 10^{-7}t^4 - 3 \cdot 10^{-5}t^3 + 0,0006t^2 + 0,1255t - 0,0045 \quad R^2 = 0,9993$$

Коэффициент аппроксимации отражает корректность описания моделей, позволяющих описывать приведенные графические зависимости с точностью $R^2 > 0,97$.

На рисунке 2 представлены результаты значений ХПК фильтратов после разделения 1, 3, 5 % ВМЭ на основе индустриального масла марки «И-20А» с применением ПСА мембран с размерами пор 0,002, 0,005 и 0,010 мкм.

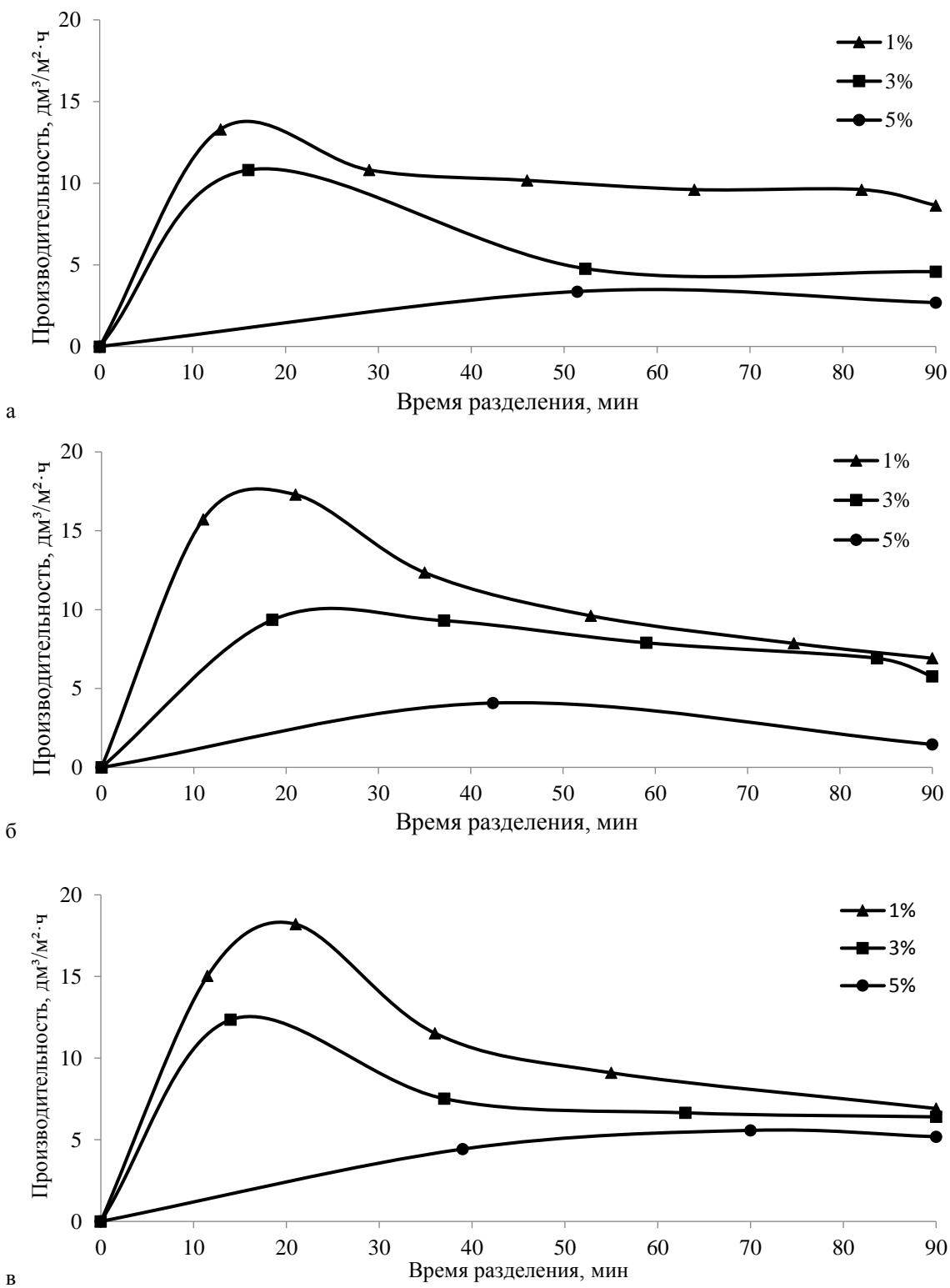


Рис. 1 – Производительность разделения ВМЭ масла 1-5% марки «И-20А» (0,1-0,5% ПАВ марки «Косинтол-242») ПСА мембранными с размером пор: а) 0,002 мкм; б) 0,005 мкм; в) 0,010 мкм

Fig. 1 – Performance of the WOE oil separation of 1-5% grade “I-20A” (0.1-0.5% surfactant grade “Kosintol-242”) PSA membranes with pore sizes: а) 0.002 μm; б) 0.005 μm; в) 0.010 μm

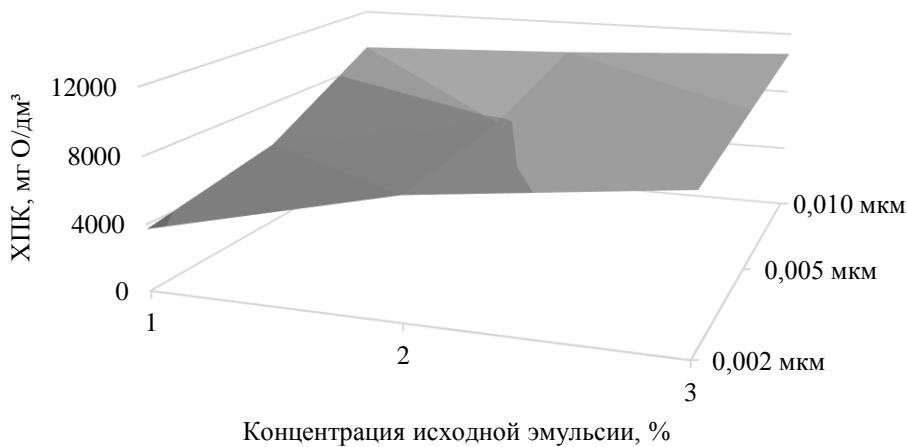


Рис. 2 – Значения ХПК фильтратов, полученных при разделении ВНЭ на базе масла марки «И-20А» (ПАВ марки «Косинтол-242») ПСА мембранами

Fig. 2 – COD values of filtrates obtained by separating WOE based on I-20A oil (Kosinitol-242 surfactant) using PSA membranes

По данным рисунка 2 видно, что с повышением исходной концентрации эмульсии, а также с увеличением размера пор используемых ПСА мембран наблюдается увеличение значений ХПК, следовательно, и снижение эффективности. Наилучшая селективность разделения ВНЭ наблюдается при использовании мембранны с наименьшим размером пор и наименьшей концентрацией эмульсии (1 %), что вполне логично.

В результате предварительных испытаний ПСА мембранны с размером пор 0,002 и 0,005 мкм отвергнуты ввиду их крайней низкой производительности и для экспериментов выбрана с большим размером пор 0,010 мкм. Ввиду того, что наблюдаются низкие значения эффективности разделения эмульсий целесообразно применить предварительную модификацию ПСА мембранны в поле униполярного коронного разряда. В этой связи, для исследования разделения приготовленной ВНЭ, соответственно, выбраны обозначенные фильтр-элементы (ПСА), обработанные в поле коронного разряда при $\tau = 1\text{--}5$ мин и $U = 5\text{--}35$ кВ.

В ходе эксперимента выявлено, что при разделении ВНЭ, увеличение производительности после коронной обработки в большинстве случаев не наблюдается, максимальное значение рассматриваемого параметра составляет $6 \text{ дм}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$. В тоже время определено, что селективность разделения эмульсий в результате плазмообработки повышается с 67,8 % до 89,3 %.

Таким образом, на данном этапе исследования значение производительности разделения остается маленьким ввиду низкой устойчивости мембранны к загрязнению, даже после плазмообработки, что обуславливает необходимость в дополнение к модификации фильтр-элементов провести обработку разделяемой среды специальными реагентами-деэмульгаторами, способствующими укрупнению частиц ВНЭ, и как следствие лучшему разделению.

На основании вышеизложенного проведена предварительная деэмульгация ВНЭ реагентами марок: «Реапон», «Сульфанол», «Separol F46», «СНПХ 4315М», «РЭНТ», после чего в полученных образцах анализатором «NanoBrook Omni» измерены размер частиц и дзета-потенциал.

Выявлено, что наибольший размер частиц эмульсий наблюдается при использовании деэмульгатора марки «РЭНТ», при этом меньшие по модулю значения дзета-потенциала, а, следовательно, меньшая агрегативная устойчивость выявлена так же у обозначенного деэмульгатора при дозировке 1 см^3 1% раствора на 100 см^3 пробы, на основании чего последний выбран для последующего разделения ВНЭ корономодифицированными ПСА мембранны с размером пор 0,010 мкм. Графическая зависимость изменения производительности от продолжительности прохождения эмульсии через мембрану представлены на рисунке 3.

Анализ данных рисунка 3 показывает, что так же как и в случае без добавления деэмульгатора, обработка ПСА мембранны коронным разрядом не способствует увеличению их производительности, однако в данном случае в отличие от предыдущего результата наблюдается значительное увеличение рассматриваемого параметра после добавления реагента марки РЭНТ, а кроме того наблюдается, как показано данными рисунка 4, более низкие значения ХПК соответствующих фильтратов, т.к. большее количество углеводородов остается в концентрате в результате реагентной обработки ВНЭ. Таким образом, при большей производительности разделения обработанной ВНЭ и более высокой эффективности обработанных ПСА фильтр-элементов, в данном случае процесс модификации мембранны в поле униполярного коронного разряда остается целесообразным при единовременном его применении с процессом предварительного деэмульгирования.

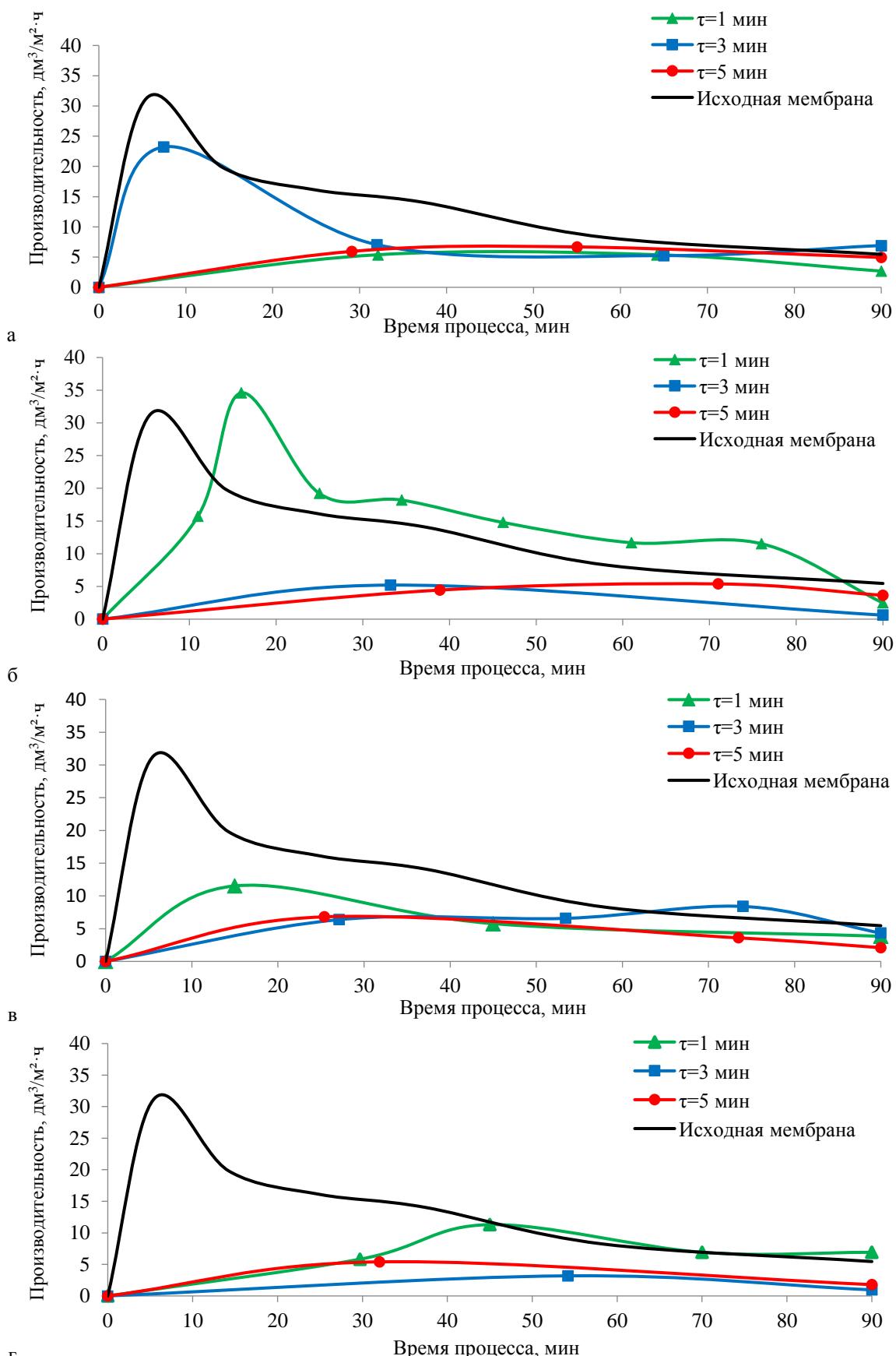


Рис. 3 – Производительность разделения ВНЭ 1% девонской нефти Тумутукского месторождения (0,1% ПАВ марки «Косинтол-242») с добавлением деэмульгатора марки «РЭНТ» ПСА мембранными с размером пор 0,010 мкм, обработанными коронным разрядом при: а) $U = 5$ кВ; б) $U = 15$ кВ; в) $U = 25$ кВ; г) $U = 35$ кВ

Fig. 3 – Separation efficiency of 1% WPE Devonian oil from the Tumutuk field (0.1% surfactant Kosintol-242) with the addition of demulsifier RENT PSA membranes with a pore size of 0.010 μm , treated with corona discharge at: a) $U = 5$ kV; b) $U = 15$ kV; c) $U = 25$ kV; d) $U = 35$ kV

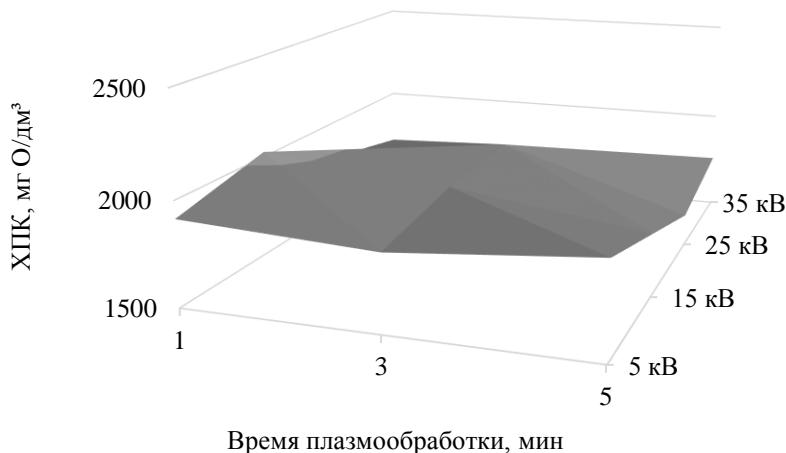


Рис. 4 – Значения ХПК фильтратов, полученных при разделении 1% ВНЭ на основе девонской нефти Тумутукского месторождения (0,1 % ПАВ марки «Косинтол-242») с добавлением деэмульгатора марки «РЭНТ» коронообработанными ПСА мембранными с размером пор 0,010 мкм

Fig. 4 – COD values of filtrates obtained by separating 1% WPE based on Devonian oil from the Tumutuk field (0.1% Kosintol-242 surfactant) with the addition of RENT demulsifier using corona-treated PSA membranes with a pore size of 0.010 μm

По результатам экспериментов определены аналитические выражения, описывающие изменения значений ХПК фильтратов мембранных разделения ВНЭ в зависимости от времени и напряжения плазмообработки мембран.

$$\text{ХПК}_{\tau=1\text{мин}} = 76,833U^3 - 626U^2 + 1449,2U + 1015 \quad R^2 > 0,99$$

$$\text{ХПК}_{\tau=3\text{мин}} = -30U^3 + 154,5U^2 - 186,5U + 1929 \quad R^2 > 0,99$$

$$\text{ХПК}_{\tau=5\text{мин}} = 41,667U^3 - 250U^2 + 311,33U + 1847 \quad R^2 > 0,99$$

Таким образом, в результате проведенных исследований выявлено увеличение производительности разделения ВНЭ на основе нефти девонского отложения с предварительной стадией деэмульгирования коронообработанными ПСА мембранными с размером пор 0,010 мкм. При применении деэмульгаторов марок «РЭНТ» наибольшая эффективность процесса разделения ВНЭ наблюдается при использовании ПСА мембран, обработанных в поле коронного разряда при $U = 35$ кВ; $\tau = 5$ мин, которое составило 90,5%, соответственно. По результатам экспериментов проведено математическое моделирование процессов мембранный очистки модельной эмульгированной сточной воды и установлена функциональная зависимость, описывающая изменение физико-химических показателей процесса очистки. В частности, в работе, используя аппарат аппроксимации функций по результатам экспериментов, построены аналитические выражения, позволяющие получить интересующие данные, не проводя множество экспериментов, что имеет большое значение при построении математических моделей исследуемого процесса.

Литература

- 1.В.А. Хрисониди, В.А. Струева, *The scientific heritage*, **50**, 3, 38-41 (2020).
- 2.Л.Н. Москвин, *Вестник Санкт-Петербургского университета. Физика. Химия*, **4**, 2, 163-214 (2017).
- 3.В.С. Бонев, И.Г. Шайхиев, В.О. Дряхлов, *Вестник Казанского технологического университета*, **16**, 8, 181-185 (2013).
- 4.В.С. Бонев, И.Г. Шайхиев, В.О. Дряхлов, *Вестник Казанского технологического университета*, **16**, 10, 158-162 (2013).
- 5.А.В. Бильдюкович, *Полимерные материалы и технологии*, **3**, 4, 6-18 (2017).
- 6.К.С. Khulbe, C. Feng, T. Matsuura, *Journal of Applied Polymer Science*, **115**, 2, 855-895 (2010).
- 7.D.J. Miller, D.R. Dreyer, C.W. Bielawski, D.R. Paul, B.D. Freeman, *Angewandte Chemie International Edition*, **56**, 17, 4662-4711 (2017).
- 8.J.S. Chang, P.A. Lawless, T. Yamamoto, *IEEE Transactions on Plasma Science*, **19**, 6, 1152-1166 (2002).
- 9.R.R. Nabiev, V.O. Dryakhlov, I.G. Shaikhiev, M.F. Galikhanov, I.R. Nizameev, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, **59**, 2, 236-242 (2023).
10. M.M.N. Nikkho, K. Tahvildari, M.A.G. Ghasri, S. Habibi, S. Nourbakhsh, *Journal of Theoretical and Applied Physics*, **18**, 2, 1-13 (2024).
11. V.O. Dryakhlov, I.G. Shaikhiev, M.F. Galikhanov, S.V. Sverguzova, *Membranes and Membrane Technologies*, **2**, 3, 195-202 (2020).
12. I.G. Shaikhiev, V.O. Dryakhlov, M.F. Galikhanov, D.D. Fazullin, G.V. Mavrin. Inorganic Materials: Applied Research, **11**, 1160–1164 (2020).
13. И.Г. Шайхиев, В.О. Дряхлов, Г.Ш. Сафина, В.А. Ненов, А.И. Назмиева, Б.С. Бонев, *Вестник технологического университета*, **18**, 13, 242-245 (2015).
14. В.О. Дряхлов, М.Ю. Никитина, Т.И. Шайхиев, И.А. Загидуллина, С.В. Фридланд, *Вестник Казанского технологического университета*, **17**, 14, 103-105 (2014).
15. В.О. Дряхлов, М.Ю. Никитина, Т.И. Шайхиев, М.Ф. Галиханов, И.Г. Шайхиев, *Вода: химия и экология*, **11**, 98-102 (2014).
16. Л.И. Галиева, А.В. Федотова, В.О. Дряхлов, И.Г. Шайхиев, Г.Ф. Гараева, *Вестник технологического университета*, **20**, 5, 127-129. (2017).
17. М.Г. Ахмадиев, Ф.Ф. Шакиров, И.Г. Шайхиев, *Вестник Казанского технологического университета*, **10**, 217-222 (2011).

18. М.Г. Ахмадиев, Ф.Ф. Шакиров, Л.М. Назипова, Б.М. Ахмадиев, И.Г. Шайхиев, *Вестник Казанского технологического университета*, 17, 8, 47-49 (2014).
19. Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков, *Численные методы*, 356 (1987).

References

1. V.A. Chrisonidi, V.A. Strueva, *The scientific heritage*, **50**, 3, 38-41 (2020).
2. L.N. Moskvina, *Bulletin of St. Petersburg University. Physics. Chemistry*, **4**, 2, 163-214 (2017).
3. B.S. Bonev, I.G. Shaykhiiev, V.O. Dryakhlov, *Herald of Kazan Technological University*, **16**, 8, 181-185 (2013).
4. B.S. Bonev, I.G. Shaykhiiev, V.O. Dryakhlov, *Herald of Kazan Technological University*, **16**, 10, 158-162 (2013).
5. A.V. Bildukovich, *Polymer Materials and Technologies*, **3**, 4, 6-18 (2017).
6. K.C. Khulbe, C. Feng, T. Matsuura, *Journal of Applied Polymer Science*, 115, 2, 855-895 (2010).
7. D.J. Miller, D.R. Dreyer, C.W. Bielawski, D.R. Paul, B.D. Freeman, *Angewandte Chemie International Edition*, 56, 17, 4662-4711 (2017).
8. J.S. Chang, P.A. Lawless, T. Yamamoto, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 19, 6, 1152-1166 (2002).
9. R.R. Nabiev, V.O. Dryakhlov, I.G. Shaikhiev, M.F. Galikhanov, I.R. Nizameev, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, **59**, 2, 236-242 (2023).
10. M.M.N. Nikkho, K. Tahvildari, M.A.G. Ghasri, S. Habibi, S. Nourbakhsh, *Journal of Theoretical and Applied Physics*, **18**, 2, 1-13 (2024).
11. V.O. Dryakhlov, I.G. Shaikhiev, M.F. Galikhanov, S.V. Sverguzova, *Membranes and Membrane Technologies*, **2**, 3, 195-202 (2020).
12. I.G. Shaikhiev, V.O. Dryakhlov, M.F. Galikhanov, D.D. Fazullin, G.V. Mavrin. *Inorganic Materials: Applied Research*, **11**, 1160-1164 (2020).
13. I.G. Shaikhiev, V.O. Dryakhlov, G.Sh. Safina, V.A. Nenov, A.I. Nazmiev, B.S. Bonev, *Herald of Technological University*, 18, 13, 242-245 (2015).
14. V.O. Dryakhlov, M.Yu. Nikitina, T.I. Shaykhiiev, I.A. Zagidullina, S.V. Fridland, *Herald of Kazan Technological University*, **17**, 14, 103-105 (2014).
15. V.O. Dryakhlov, M.Yu. Nikitina, T.I. Shaykhiiev, M.F. Galikhanov, I.G. Shaykhiiev, *Water: Chemistry and Ecology*, 11, 98-102 (2014).
16. L.I. Galieva, A.V. Fedotova, V.O. Dryakhlov, I.G. Shaykhiiev, G.F. Garaeva, *Herald of Technological University*, **20**, 5, 127-129. (2017).
17. M.G. Akhmadiev, F.F. Shakirov, I.G. Shaykhiiev, *Herald of Kazan Technological University*, 10, 217-222 (2011).
18. M.G. Akhmadiev, F.F. Shakirov, L.M. Nazipova, B.M. Akhmadiev, I.G. Shaykhiiev, *Herald of Kazan Technological University*, 17, 8, 47-49 (2014).
19. N.S. Bakhvalov, N.P. Zhidkov, G.M. Kobelkov, *Numerical Methods*, 356 (1987).

© **В. О. Дряхлов** – к.т.н., доцент, И.О. заведующего кафедрой Инженерной экологии (ИЭ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, vladisloved@mail.ru; **М. Г. Ахмадиев** – к.ф-м.н., доцент кафедры Высшей математики, КНИТУ, AkhmadievMG@corp.knrtu.ru; **М. Ю. Алексеева** – ассистент кафедры ИЭ, КНИТУ, musoek@mail.ru; **И. Г. Шайхиев** – д.т.н., профессор кафедры ИЭ, КНИТУ, ildars@inbox.ru; **М. Ф. Галиханов** – д.т.н., профессор, директор ОСП Институт прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан, mgalikhanov@yandex.ru.

© **V. O. Dryakhlov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Acting Head of the Department of Engineering Ecology (EE), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, vladisloved@mail.ru; **M. G. Akhmadiev** – PhD (Physical and Mathematical Sci.), Associate Professor, Department of Higher Mathematics, KNRTU, AkhmadievMG@corp.knrtu.ru; **M. Yu. Alekseeva** – Assistant, the EE department, KNRTU, musoek@mail.ru; **I. G. Shaikhiev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor at the EE department, KNRTU, ildars@inbox.ru; **M. F. Galikhanov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Director of the Institute of Applied Research of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, mgalikhanov@yandex.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 28.06.25.
Дата принятия рукописи в печать – 29.09.25.