

УДК 66.081.63;66.081.6-278

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2022 г. Д. Д. Фазуллин^а, *, Г. В. Маврин^а, Л. И. Фазуллина^а

^аКазанский федеральный университет, Набережные Челны

*e-mail: denr3@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.11.2021 г.

После доработки 21.11.2021 г.

Принята к публикации 15.02.2022 г.

Для интенсификации процесса мембранного разделения нефтяных эмульсий мембранный элемент подвергали постоянному воздействию ультразвуковых колебаний частотой 35 кГц. При разделении нефтяной эмульсии установлено снижение производительности мембран от 22 до 40 раз, вследствие накопления частиц нефти в примембранном слое. В результате воздействия ультразвука на мембраны наблюдается увеличение удельной производительности до 30% для мембран микрофильтрации и до 45% для мембран ультрафильтрации. Воздействие ультразвука не позволяет агрегации частиц нефти и предотвращает образование гелевого слоя. После разделения нефтяной эмульсии полимерными мембранами концентрация нефтепродуктов снижается. Задерживающая способность микрофильтрационных мембран по нефтепродуктам составила от 79 до 88%, задерживающая способность ультрафильтрационных мембран составила от 91 до 99%. Под воздействием ультразвука между частицами нефти и дисперсионной среды возникают силы трения, что приводит к уменьшению размеров частиц, что увеличивает вероятность проскока частиц через поры мембраны. Снижение задерживающей способности для мембран микрофильтрации в среднем составила 3%, для мембран ультрафильтрации на 0.6%.

Ключевые слова: микрофильтрация, ультрафильтрация, мембрана, политетрафторэтилен, полисульфонамид, полиэфирсульфон, нефть, эмульсия

DOI: 10.31857/S0040357122030058

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение воды нефтью и нефтепродуктами наносит ущерб, превышающий другие виды воздействия на природу. Они образуют пленку на поверхности водных объектов, что уменьшает испарение воды на 60%. При этом изменяется запах, вкус, вязкость воды, уменьшается количество кислорода, появляются вредные органические вещества, вода приобретает токсические свойства. Наличие нефти и нефтепродуктов в водоемах может привести к отравлению водных организмов с летальным исходом, серьезным нарушениям их физиологической активности.

Нефть и ее компоненты в окружающей среде вызывают изменение физических, химических и биологических свойств и характеристик природной среды обитания, нарушают ход естественных биохимических процессов. При трансформации углеводородов нефти могут образоваться стойкие к микробиологическому расщеплению еще более токсичные соединения, обладающие канцерогенными и мутагенными свойствами.

Нефтедержащие сточные воды представляют собой сложную гетерогенную полидисперсную систему, и состоят из загрязнений минерального и органического происхождения.

Большое количество нефтедержащих стоков образуются на предприятиях, напрямую не связанных с нефтепереработкой. Учитывая большое количество этапов, проходящих от нефтедобычи до получения конечных продуктов, сточные воды нефтепереработки отличаются довольно большим разнообразием.

Пластовые воды – это нефтяная вода, которая находится в нефтяном пласте. Данная вода обычный спутник нефтяных месторождений. В месторождении она залегает в тех же пластах, что и нефть, а также в собственно водоносных горизонтах. После отстоя в резервуарах сырой нефти, эта вода сбрасывается из нижней части резервуара и содержит весьма существенные количества сырой нефти и взвешенных веществ. Состав воды, колеблется в широких пределах, после отстоя в резервуарах сырой нефти, содержание собственно нефти достигает от 50–100 мг/дм³ до 10–20 г/дм³ по нефтепродуктам, по взвесям различного характера от

10 до 500 мг/дм³ и более. Такая вода, как правило, не содержит специфических загрязнителей нефтепереработки. Учитывая такие объемы и состав, использовать ее в производственном цикле или сбрасывать подобную воду или без дополнительной очистки невозможно.

Образуются нефтесодержащие сточные воды в результате производственных процессов переработки нефти и на каждом из таких этапов образуются сточные воды со своим специфическим составом и подчас наличием специфических компонентов. К наиболее частым стокам нефтепереработки можно отнести: воду после обессоливания нефти, конденсаты перегонки, конденсаты каталитического крекинга и гидрокрекинга, пиролизные стоки.

Для очистки нефтесодержащих сточных вод применяются множество методов, это – механические методы: отстойники, нефтеловушки; физико-химические методы: коалесценция, флотация, коагуляция, электрокоагуляция, сорбция, мембранные методы; химические: деэмульгация, разложение неорганическими кислотами, реагентами, термическое разложение, дистилляция; биологические методы [1–4].

Наиболее эффективным и экологически чистым методом являются мембранные методы. В процессе мембранного разделения образуются фильтрат – водная фаза и концентрат – нефтепродукты. Преимущества мембранного метода по сравнению с классическими методами очистки заключается в высокой эффективности и селективности разделения, низком расходе энергоресурсов, отсутствие необходимости применения химических реагентов, отсутствие сложного оборудования и движущихся частей.

Для разделения и очистки нефтесодержащих сточных вод в зависимости от размера частиц дисперсной фазы используют процессы микрофильтрации и ультрафильтрации [5, 6]. Сами же мембранные элементы изготавливаются из пористой керамики, стекла, из сплавов металлов и полимерных материалов [7, 8]. Больше всего распространены полимерные мембранные элементы из ацетата целлюлозы, полиамидов, полиакриламида, полисульфона и политетрафторэтилена [9–11].

К основным недостаткам мембранного метода можно отнести снижение удельной производительности мембран из-за явления концентрационной поляризации на поверхностном слое мембраны, которое приводит к образованию гелевого слоя. Для восстановления производительности или снижения явления концентрационной поляризации проводят ряд мероприятий. Во первых это предварительная очистка сточных вод и предварительная обработка сточной воды для предотвращения блокирования мембран нерастворимыми или осадкообразующими компонентами, для

этого используются механические фильтры, адсорбционные колонны, коагулянты [12]. Во вторых замена тупикового способа фильтрации на тангенсальный, создание турбулентных потоков жидкости над поверхностью мембран, применение вращающихся мембранных элементов [13]. Так же имеются работы, в которых на мембрану воздействуют вибрацией, ультразвуком и т.д. [14, 15]. В третьих, регенерация мембран промывкой моющими растворами [16]. Обычно процедура мойки многоступенчата и занимает довольно продолжительное время. Поэтому целесообразно предотвращать образование гелевого слоя.

Целью работы является интенсификация процесса разделения нефтяных эмульсий путем исследования влияния ультразвука на параметры мембранного процесса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание и исследование свойств мембран. Разделение нефтяных эмульсий мембранными методами провели с помощью мембран микрофильтрации марок МФФК-3Г и МФФК-1Г, мембран ультрафильтрации марок УПМ-100, ПЭС-100, ПЭС-300 производства ЗАО НТЦ “Владипор”, г. Владимир.

Микрофильтрационные фторопластовые композиционные гидрофильные мембраны МФФК-1Г и МФФК-3Г представляет собой пористый пленочный материал на основе фторопласта Ф42Л на подложке из нетканых материалов с размером пор 0.15 и 0.45 мкм соответственно, общей пористостью 80–85%.

Ультрафильтрационная мембрана УПМ-100 представляет собой пористую полимерную пленку на основе ароматического полисульфонамида “Сульфон – 4Т” на подложке нетканый лавсан, размер отсекаемых частиц составляет 100 КДа.

Ультрафильтрационные мембраны марок ПЭС-100, ПЭС-300 из полиэфирсульфона (ПЭС) гидрофильны, имеют высокие скорости потока благодаря своей симметричной структуре, имеют низкую неспецифичную адсорбцию белка и химически устойчивы во всем диапазоне pH 1–14. Размер отсекаемых частиц составляет 100 и 300 КДа, соответственно.

Размер частиц дисперсной фазы эмульсии, определили методом динамического светорассеяния, а ζ -потенциал частиц дисперсной фазы суспензии методом PALS (светорассеяние с анализом фаз) в методе детектируется сдвиг фазы рассеянного света, с помощью анализатора марки “Nano Brook Omni”.

Методом сидячей капли с использованием аппарата “Kruss DSA 20E” проводили измерение краевого угла смачивания исследуемых образцов мембран каплей дистиллированной воды.

Общая пористость мембран измерялась путем пропитки образца дистиллированной водой и определением массы до и после пропитки. По полученным данным рассчитывалась общая пористость по формуле:

$$P = \frac{(m_k - m_0)}{V \rho_{\text{ж}}} \times 100\% = \frac{m_k - m_0}{\frac{\rho_{\text{ж}}}{\frac{m_k - m_0}{\rho_{\text{ж}}} + \frac{m_0}{\rho_m}}} \times 100\%,$$

где: $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости; ρ_m – плотность мембраны; m_0 – масса исходной мембраны; m_k – масса мембраны после пропитки дистиллированной водой.

Определение водопоглощения мембран проведена с помощью анализатора влажности марки ML-50, в котором реализован принцип термогравиметрического анализа. При данном анализе происходит высушивание образца с помощью галогеновой лампы и определение содержания влаги (в %), вычисляемой на основе разности между влажным и сухим весом.

Свойства нефтяных эмульсий. Процесу ультрафильтрации подвергали модельные нефтяные 0.01, 0.1 и 1% эмульсии, которые получили диспергированием карбоновой нефти в дистиллированной воде с добавлением додецилсульфата натрия. Для приготовления эмульсии применялась нефть карбонового отложения, добытая НГДУ “Лениногорскнефть”, свойства которой приведены в табл. 1.

Сначала получили концентрат эмульсии: в 500 см³ дистиллированной воде растворили 15 г додецилсульфата натрия и добавили 50 г нефти. Потом концентрат эмульсии перемешивали с помощью автоматической мешалки, скорость вращения мешалки составила 3000 об/мин, время перемешивания 15 мин. Для получения 0.01, 0.1 и 1% нефтяной эмульсии концентрат разбавили дистиллированной водой.

В качестве основных показателей процесса ультрафильтрации нефтяной эмульсии рассматривалась удельная производительность и степень разделения модельной нефтяной эмульсии, которая вычислялась как отношение содержания нефтепродуктов в эмульсии до и после разделения, определяемых с помощью концентрата марки “КН-3”.

Мембранное разделение эмульсии. Процесс разделения нефтяной эмульсии проводили на лабораторной установке мембранного разделения. Для разделения нефтяной эмульсии динамической мембраной прилагалось рабочее давление 0.7 МПа, температура жидкости составляла 25°C. Исходная нефтяная эмульсия насосом подается на мембранный модуль. Под действием рабочего давления происходит разделение потока на две

Таблица 1. Физико-химические свойства нефти карбонового отложений

№	Наименование показателя	Значение
1	ρ , (при $T = 20^\circ\text{C}$), г/см ³	883
2	М воды, %	0.08
3	М механических примесей, %	0.009
4	М серы, %	3.47
5	М асфальтенов, %	4.85
6	М парафинов, %	2.60
7	М силикатных смол, %	20.4
8	μ (при $t = 20^\circ\text{C}$), мПа с	19.0

части: частично очищенный от нефти фильтрат, который собирается в приемную емкость, и концентрат, который постоянно возвращается в исходную емкость. В процессе работы происходит постепенное концентрирование примесей до максимально возможных значений. При разделении эмульсии под действием ультразвука герметичный мембранный модуль помещали в ультразвуковую ванну марки “Сапфир – 9.5 ТТЦ”, наполненную дистиллированной водой. Технические характеристики ультразвуковой ванны:

Рабочая частота, ν – 35 кГц;

Объем, V – 9.5 дм³;

Потребляемая мощность, N – 640 Вт;

Мощность генератора, N – 200 Вт;

Количество излучателей, n – 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования состава и свойств нефтяных эмульсий. Результаты исследования состава и свойств, модельных 0.01% нефтяных эмульсий представлены в табл. 2.

По результатам исследования состава эмульсий, установлено высокое содержание нефтепродуктов и выявлена щелочная реакция среды. Концентрации поллютантов в составе эмульсии сравнили с предельно допустимой концентрацией загрязняющих веществ в воде водных объектов рыбохозяйственного значения, в связи с тем, что все водные объекты республики Татарстан рыбохозяйственного значения. Установлены превышения нормативов по показателям: нефтепродукты, БПК₅, ионы алюминия, железа, селена и цинка.

Далее исследовали распределение размеров частиц дисперсной фазы эмульсии и ξ -потенциал эмульсий. Результаты исследований представлены на рис. 1–2.

По данным представленным на рис. 1 выявлено, что нефтяные эмульсии из нефти девонского

Таблица 2. Состав и свойства 0.01% модельных нефтяных эмульсий

№ п/п	Показатель	Нефтяная эмульсия		С _{пдк} , мг/дм ³ *
		из нефти девонского отложения	из нефти карбонового отложения	
1	C _{Al} , мг/дм ³	0.072	0.004	0.04
2	C _{Ba} , мг/дм ³	0.030	<0.001	0.74
3	C _{Fe} , мг/дм ³	0.143	0,061	0.1
4	C _{Mn} , мг/дм ³	0.003	<0.001	0.01
5	C _{Se} , мг/дм ³	0.002	<0.001	0.002
6	C _{Sr} , мг/дм ³	0.015	<0.001	0.4
7	C _{Zn} , мг/дм ³	0.331	0.100	0.01
8	C _{Ag} , мг/дм ³	<0.001	0.044	—
9	C _{Ca} , мг/дм ³	5.62	1.92	180
10	C _{Mg} , мг/дм ³	0.763	0.405	40.0
11	C _{SO₄} , мг/дм ³	142	169	100
12	C _{Cl} , мг/дм ³	39.5	51.2	300
13	C _{HCO₃} , мг/дм ³	48.8	61.0	—
13	ХПК, мгО/дм ³	214	257	—
14	БПК ₅ , мгО/дм ³	86.0	108	2.1
15	C _{Нефтепродукты} , мг/дм ³	93,2	110	0.05
16	κ_j , мксм/см	373	438	—
17	C _{Минерализация} , мг/дм ³	209	177	—
18	pH, ед. pH	10.1	10.2	—

* Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, по приказу Минсельхоза России от 13 декабря 2016 года N 552.

отложения являются полидисперсной системой с двумя пиками. При снижении концентрации нефти в эмульсии установлено увеличение размеров частиц дисперсной фазы. Значение ξ -потенциала эмульсий составила -79.5 мВ

Размеры частиц дисперсной фазы 0.1% полидисперсной эмульсии из нефти карбонового отложения распределены в диапазонах 191–458 и 3600–7500 нм, а размеры частиц более разбавленной эмульсии распределены в диапазонах 99–183 и 6305–8574 нм, ξ -потенциал эмульсии составляет -69.3 мВ. Таким образом, для полного удаления частиц нефти из эмульсии требуется мембрана со средним размером пор менее 0.1 мкм.

Свойства мембран и параметры мембранного разделения эмульсий. Свойства мембран микрофильтрации и ультрафильтрации использованные для разделения нефтяных эмульсий представлены в табл. 3.

Представленные в таблице мембраны способны работать в агрессивных средах с высокой температурой разделяемой жидкости и в широком диапазоне водородного показателя. В связи с тем, что минимальные размеры частиц дисперсной фазы нефтяных эмульсий установлены от 0.1 мкм, при разделении эмульсии с помощью мембран марок УПМ-100, ПЭС-100 и ПЭС-300 ожидается высокая степень разделения эмульсии.

Основные параметры процессов мембранного разделения это удельная производительность и задерживающая способность мембран. Результаты исследований удельной производительности мембран по дистиллированной воде и по модельной эмульсии карбонового отложения представлены в табл. 4.

По данным табл. 4 удельная производительность мембран по дистиллированной меняется в зависимости от размеров пор. При разделении нефтяной эмульсии установлено снижение производительности мембран от 22 до 40 раз, вследствие накопления

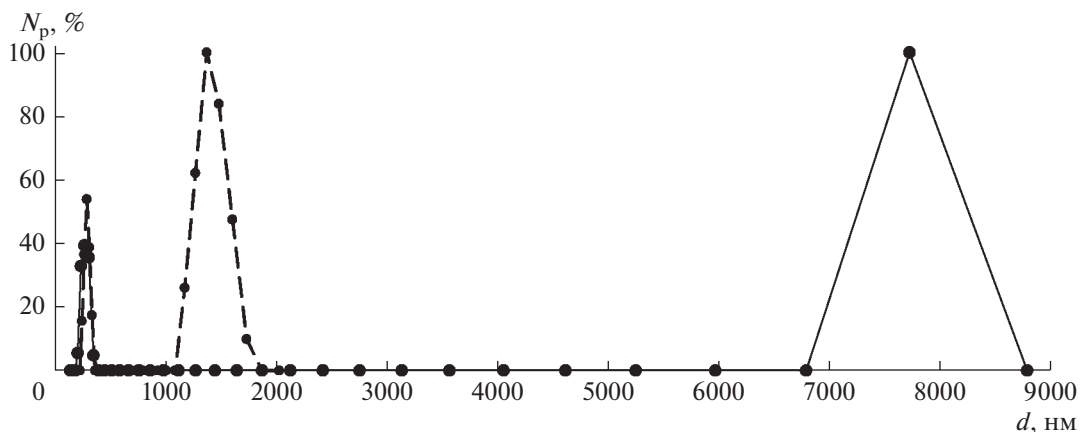


Рис. 1. График распределения размера частиц дисперсной фазы нефтяных эмульсий из нефти девонского отложения: сплошная линия – 0.01% эмульсия; прерывистая линия – 0.1% эмульсия.

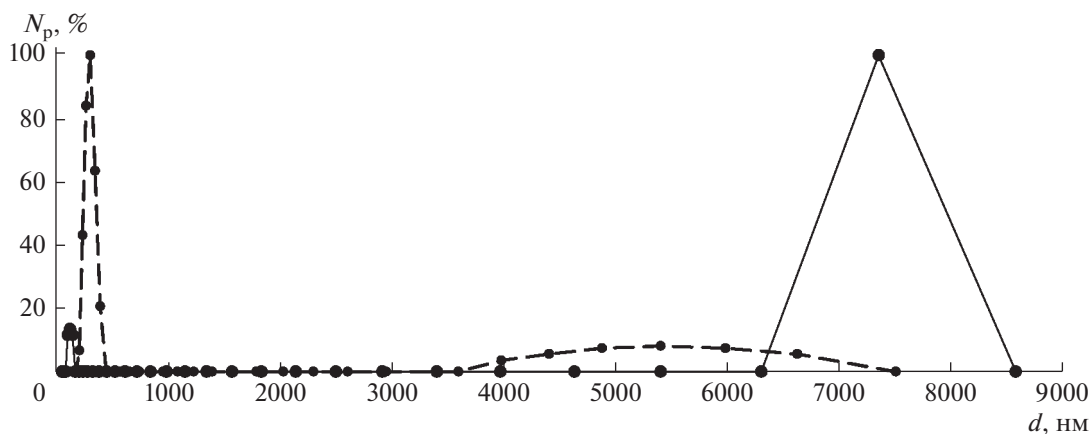


Рис. 2. График распределения размера частиц дисперсной фазы нефтяных эмульсий из нефти карбонового отложения: сплошная линия – 0.01% эмульсия; прерывистая линия – 0.1% эмульсия.

частиц нефти в примембранном слое. Из сопоставления данных по производительности исследованных мембран с литературными сведениями видно, что производительность мембран также интенсивно снижается при разделении эмульсий.

В табл. 5 представлены результаты влияния ультразвукового воздействия на производительность мембран в процессе разделения нефтяных эмульсий.

По данным табл. 5 установлено, что с увеличением содержания нефтепродуктов происходит непрерывное снижение удельной производительности мембран, что связано с явлением концентрационной поляризации, чем выше концентрация, тем интенсивнее процесс. В последующем процесс концентрационной поляризации приводит к образованию сорбции частиц нефти в порах мембраны и образованию гелевого слоя на поверхности мем-

Таблица 3. Свойства мембран

Мембрана	$M_{H_2O}, \%$	$\theta, ^\circ$	$d, \text{мкм}$	$t, ^\circ\text{C}$	pH, pH
МФФК-ЗГ	48.5	80.6°	0.45	80	1–12
МФФК-1Г	43.4	60.0°	0.15	100	2–12
УПМ-100	52.7	75.3°	≈0.006	85	1–14
ПЭС-100	49.6				
ПЭС-300	50.2		≈0.01		

Таблица 4. Удельная производительность мембран

Мембрана	$G, \text{дм}^3/\text{м}^2 \text{ч}$	
	по дистиллированной воде ($P = 0.35 \text{ МПа}$)	по 1% нефтяной эмульсии ($P = 0.6 \text{ МПа}$)
МФФК-3Г	12507	298
МФФК-1Г	3747	130
УПМ-100	907	37.5
ПЭС-100	698	29.0
ПЭС-300	1153	52.1

Таблица 5. Удельная производительность мембран по модельным эмульсиям из нефти карбонового отложения

Мембрана	$C_{\text{нефть}}, \%$	$G, \text{дм}^3/\text{м}^2 \text{ч}$ ($P = 0.6 \text{ МПа}$)	
		без УЗ	с УЗ
МФФК-3Г	0.01	2506	2644
	0.1	2001	2078
	1	298	329
МФФК-1Г	0.01	1748	2508
	0.1	1180	1802
	1	130	142
УПМ-100	0.01	980	1790
	0.1	768	1384
	1	37.5	59.3
ПЭС-100	0.01	696	980
	0.1	541	821
	1	29.0	46.9
ПЭС-300	0.01	1154	1402
	0.1	850	1094
	1	52.1	87.5

Таблица 6. Задерживающая способность мембран по нефтепродуктам из модельных эмульсий

Мембрана	$C_{\text{нефть}}, \%$	$\phi, \%$	
		без УЗ	с УЗ
МФФК-3Г	0.01	80.5	78.3
	0.1	79.2	77.0
	1	78.9	73.6
МФФК-1Г	0.01	88.3	86.6
	0.1	85.0	85.7
	1	83.5	80.6
УПМ-100	0.01	96.2	95.5
	0.1	96.7	95.3
	1	95.9	94.4
ПЭС-100	0.01	98.9	98.6
	0.1	98.0	98.1
	1	97.4	97.0
ПЭС-300	0.01	95.1	94.9
	0.1	93.4	93.2
	1	91.2	90.7

браны. Для удаления гелевого слоя стандартно проводят промывку мембраны моющими растворами, что требует остановки мембранного процесса разделения. Одним из способов выхода из данной ситуации является использование ультразвукового воздействия на мембранный модуль. Результаты, представленные в табл. 4 показали эффективность данного способа, в результате воздействия ультразвука на мембраны наблюдается увеличение удельной производительности до 30% для мембран микрофльтрации и до 45% для мембран ультрафльтрации. Воздействие ультразвука не позволяет проявлению явления агрегации частиц нефти и предотвращает образование гелевого слоя.

Далее исследовали влияние ультразвукового воздействия на задерживающую способность мембран по показателю нефтепродукты. Результаты исследования представлены в табл. 6.

Концентрация нефтепродуктов в исходной 1% нефтяной эмульсии составила 8620 мг/дм^3 , в 0.1% эмульсии – 903 мг/дм^3 , в 0.01% эмульсии – 95 мг/дм^3 . После разделения нефтяной эмульсии полимерными мембранами концентрация нефтепродуктов снижается. Задерживающая способность микрофльтрационных мембран по нефтепродуктам составила от 79 до 88%, задерживающая способность ультрафльтрационных мембран составила от 91 до 99%. По результатам исследования установлено снижение задерживающей способности мембран с увеличением концентрации нефтепродуктов в исходной эмульсии. Высокая степень разделения эмульсии достигается с помощью мембраны из полиэфирсульфона с размером отсекаемых частиц 100 КДа. При воздействии на мембраны ультразвука в процессе разделения эмульсии наблюдается незначительное снижение задерживающей способности по нефтепродуктам (табл. 5), что связано диспергированием частиц нефти в эмульсии. Под воздействием ультразвука между частицами нефти и дисперсионной среды возникают силы трения, что приводит к уменьшению размеров частиц, что увеличивает вероятность проскока частиц через поры мембраны. Снижение задерживающей способности для мембран микрофльтрации в среднем составила 3%, для мембран ультрафльтрации на 0.6%.

ВЫВОДЫ

Для интенсификации процесса мембранного разделения нефтяных эмульсий мембранный элемент подвергали постоянному воздействию ультразвуковых колебаний частотой 35 кГц. Исходные эмульсии с содержанием нефти от 0.01 до 1% являются полидисперсными системами с размером частиц от 100 до 8000 нм. Для разделения частиц с соответствующими размерами использовали мик-

рофилтрационные и полимерные мембраны устойчивые к агрессивным средам.

При разделении нефтяной эмульсии установлено снижение производительности мембран от 22 до 40 раз, вследствие накопления частиц нефти в примембранном слое. В результате воздействия ультразвука на мембраны наблюдается увеличение удельной производительности до 30% для мембран микрофилтрации и до 45% для мембран ультрафилтрации. Воздействие ультразвука не позволяет агрегации частиц нефти и предотвращает образование гелевого слоя.

После разделения нефтяной эмульсии полимерными мембранами концентрация нефтепродуктов снижается. Задерживающая способность микрофилтрационных мембран по нефтепродуктам составила от 79 до 88%, задерживающая способность ультрафилтрационных мембран составила от 91 до 99%. Под воздействием ультразвука между частицами нефти и дисперсионной среды возникают силы трения, что приводит к уменьшению размеров частиц, что увеличивает вероятность проскока частиц через поры мембраны. Снижение задерживающей способности для мембран микрофилтрации в среднем составила 3%, для мембран ультрафилтрации на 0.6%.

Результаты лабораторных исследований показывают, что воздействие ультразвуковых колебаний на процессы мембранного разделения в жидких средах позволяет изменить скорость процессов, протекающих между двумя неоднородными средами. Так же постоянное воздействие ультразвука на мембрану во время мембранного процесса экспериментально доказывает возможность увеличения периода непрерывной эксплуатации.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

C	концентрация вещества в жидкости, мг/дм ³
d	средний диаметр пор мембран, мкм
G	удельная производительность, дм ³ /м ² ч
m	масса, г
M	массовая доля вещества, %
n	количество, шт.
N	мощность, Вт
N_p	количество частиц дисперсной фазы, %
ρ	плотность, г/см ³
P	давление, МПа
pH	водородный показатель, pH
t	температура, °C
V	объем, дм ³
ζ	дзета потенциал, мВ
ν	частота, Гц

ϕ	задерживающая способность мембран, %
θ	краевой угол смачивания мембран каплей воды, °
μ	динамическая вязкость, мПа с
κ_j	удельная электрическая проводимость, мкСм/см

ИНДЕКСЫ

УЗ	ультразвук
ХПК	химическое потребление кислорода
БПК ₅	биологическое потребление кислорода установленное за 5 суток

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Петров В.Г., Шумилова М.А., Столов В.В., Марков А.В.* Использование коагулянтов для обезвреживания водно-масляных, водно-нефтяных и водно-жировых эмульсий в отходах производства // Вестник КИГИТ. 2014. № 14. С. 43.
2. *Варламова С.И., Варламова И.С., Климов Е.С.* Разложение кислотами отработанной эмульсии "ВЕЛС-1" // Современные наукоемкие технологии. 2005. № 4. С. 68.
3. *Каратун О.Н., Морозов А.Ю., Федулаева Т.Н., Якушева Е.О., Танаянц О.В., Шардыко В.В.* Результаты испытаний различных деэмульгаторов для подготовки высокосернистого стабильного конденсата астраханского газоконденсатного месторождения // Технологии нефти и газа. 2020. № 6. С. 11.
4. *Fazullin D.D., Mavrin G.V.* Effect of the pH of Emulsion on Ultrafiltration of Oil Products and Nonionic Surfactants // Petroleum Chemistry. 2017. V. 57. № 11. P. 969.
5. *Каширин А.О., Копылова Л.Е., Свитцов А.А., Каширина О.В.* Гибридная технология разделения водно-масляных эмульсий, сочетающая коалесцентную филтрацию и микрофилтрацию // Успехи в химии и химической технологии. 2013. Т. 27. № 8. С. 130.
6. *Yu L., Kanazashi M., Nagasawa H., Tsuru T.* Phase inversion / sintering-induced porous ceramic microsheet membranes for high-quality separation of oily wastewater // J. Membrane Science. 2020. V. 595. P. 117477.
7. *Fazullin D.D., Mavrin G.V., Shaikhiev I.G., Nizameev I.R.* Ultrafiltration of Oil-in-Water Emulsions with a Dynamic Nylon—Polystyrene Membrane // Petroleum Chemistry. 2018. V. 58. № 2. P. 145.
8. *Zhu L., Chen M., Dong Y., Tang C. Y., Huang A., Li L.* A low-cost mullite-titania composite ceramic hollow fiber microfiltration membrane for highly efficient separation of oil-in-water emulsion // Water Research. 2016. V. 90. P. 277.
9. *He N., Li L., Chen J.* Extraordinary Superhydrophobic Polycaprolactone-Based Composite Membrane with an Alternated Micro-Nano Hierarchical Structure as an Eco-friendly Oil / Water Separator // Acs applied materials & interfaces. 2021. V. 13. Issue 20. P. 24117.

10. *Fazullin D.D., Mavrin G.V.* Separation of Water-Oil Emulsions Using Composite Membranes with a Cellulose Acetate Surface Layer // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2019. V. 55. Issue 7–8. P. 649.
11. *Fazullin D.D., Mavrin G.V., Shaikhiev I.G.* Effect of MW Radiation on Thin-Film Polymer Membranes // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2020. V. 56. P. 105.
12. *Jamaly S., Giwa A., Hasan S. W.* Recent improvements in oily wastewater treatment: Progress, challenges, and future opportunities // *Journal of environmental sciences*. 2015. V. 37. P. 15.
13. *Sarkar B., De S.* Prediction of permeate flux for turbulent flow in cross flow electric field assisted ultrafiltration // *Journal of Membrane Science*. 2011. V. 369. P. 77.
14. *Zhang R.Y., Huang Y., Wang Z.J.* Study on ultrasonic techniques for enhancing the separation process of membrane // *Ultrasonic s sonochemistry*. 2019. V. 55. P. 341.
15. *Ostasevicius V., Golinka E. Gaidys R.* High frequency separation of suspended micro/nanoparticles // *Mechanika*. 2017. V. 23. P. 408.
16. *Menne D., Uzum C., Wessling M.* Regenerable polymer/ceramic hybrid nanofiltration membrane based on polyelectrolyte assembly by layer-by-layer technique // *Journal of membrane science*. 2016. V. 520. P. 924.