УДК 66.081.6

Красильников Илья Олегович, преподаватель;
Сомин Владимир Александрович, д.т.н., зав. каф.;
(АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул)
Krasilnikov Ilya Olegovich, lecturer;
Somin Vladimir Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences;
(Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ МЕМБРАН ПРИ ОЧИСТКЕ ФЕНОЛСОДЕРЖАЩИХ ВОД

INVESTIGATION OF TRANSPORT CHARACTERISTICS OF POLYMERIC MEMBRANES IN THE TREATMENT OF PHENOL-CONTAINING WATER

Аннотация. Исследовано влияние модификации полисульфонных мембран хитозаном и оксидом азота (IV) на характеристики мембран при удалении фенола из воды. Установлены зависимости селективности и проницаемости от рабочего давления, определён наиболее перспективный вариант обработки.

Abstract. The effect of chitosan and nitrogen(IV) oxide modification on phenol removal by polysulfone membranes was studied. Pressure-dependent selectivity and permeability were determined, and the most promising surface treatment was identified.

Ключевые слова: фенол, сточные воды, полисульфонная мембрана, хитозан, модификация, селективность, проницаемость.

Введение

Фенол относится к загрязняющим веществам, присутствие которых в сточных водах представляет экологическую опасность для окружающей среды. Для водных объектов рыбохозяйственного значения ПДК фенола составляет 0,001 мг/дм³ [1]. В связи с этим, при очистке фенолсодержащих стоков принципиальное значение имеют достижение высокой степени удаления загрязнителя и обеспечение устойчивой работы очистного оборудования. Фенол и его производные оказываюттоксическое действие на гидробионтов[2].

Одним из методов обработки фенолсодержащих вод является мембранное разделение, в том числе ультрафильтрация [3]. Эффективность

мембранного процесса определяется совокупностью разделительных и транспортных характеристик: селективностью по целевому компоненту и проницаемостью, характеризующей поток пермеата через единицу площади мембраны. Эти показатели взаимосвязаны, поэтому повышение задерживания растворённого вещества может сопровождаться уменьшением производительности. Один из подходов регулированияуказанных характеристик полимерных мембран – изменение их поверхностных свойств посредством модификации [4, 5].

Цель работы – оценить влияние модификации хитозаном и обработкой оксидом азота (IV) на селективность и проницаемость полисульфонных мембран при фильтровании модельного раствора фенола в диапазоне рабочего давления 6–13 атм.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись полисульфонные мембраны марок ОРМ31К и ОРМ32КМ в исходном состоянии и после модификации. Применяли два способа обработки: нанесение хитозанового слоя из раствора в разбавленной органической кислоте и обработкуоксидом азота (IV). Использование хитозана в мембранных и сорбционных материалах рассматривается как один из способов изменения их разделительных свойств [6, 7]. Обработка нитрующими агентами, в свою очередь, может приводить к изменению химического состояния поверхностного слоя полимерного материала [9].

Изменения в составе функциональных групп полисульфонаоценивали методом ИК-спектроскопии. Испытания мембран проводили на лабораторной установке, концентрация фенола в исходном растворе составляла 50 мг/л, рабочее давление варьировали в пределах от 6 до 13 атм. Площадь рабочей поверхности мембраны составляла 0,0028 м², толщина – 0,00017 м. Селективность по фенолу оценивали по степени снижения его концентрации при прохождении раствора через мембрану. Проницаемость выражали объёмом пермеата, проходящего через единицу площади мембраны за единицу времени. Сопоставление этих показателей позволяет оценить, как поверхностная обработка влияет на разделительную способность и производительность мембран[10].

Результаты и обсуждение

По данным ИК-спектроскопии, после нанесения хитозана в спектрах материала мембран полос, однозначно свидетельствующих об образовании новых химических связей между модификатором и полимерной матрицей, не выявлено. После обработки оксидом азота (IV) зарегистрированы дополнительные полосы поглощения: для мембраны ОРМ31К – в области

1740 см⁻¹, для ОРМ32КМ – в областях 1680 и 950 см⁻¹, что указывает на изменение химического состава поверхности после обработки.

Для исходной мембраны ОРМ31К (рисунок 1) селективность по фенолу составляла 26 % при давлении 6 атм и снижалась до 2,5 % при повышении давления до 13 атм. После нанесения хитозана селективность выросла до 62 % при 6 атм и до 48 % при 13 атм. Наиболее высокий и стабильный результат получен после обработки оксидом азота (IV): 98 % при 6 атм и 97 % при 13 атм. Следовательно, для мембраны ОРМ31К обработка оксидом азота (IV) обеспечила наибольшее удерживание фенола.

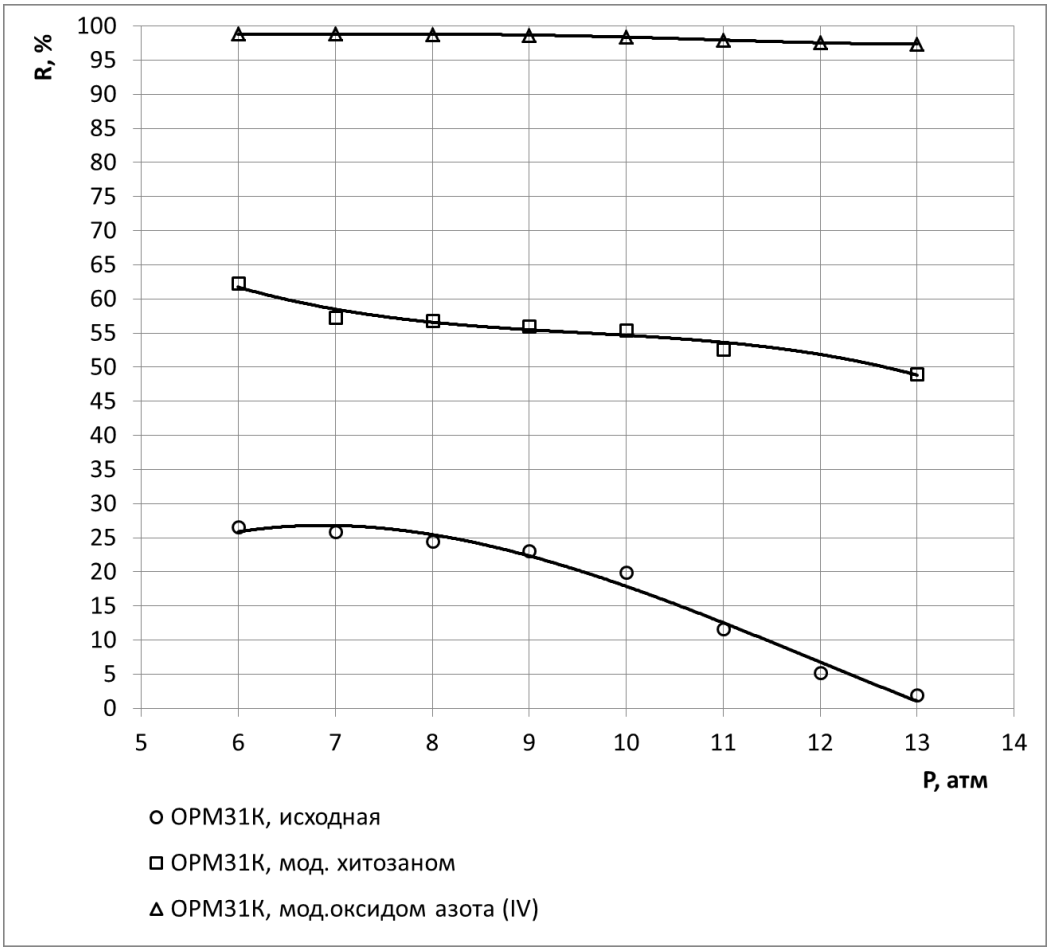

Рисунок 1 – Зависимость селективности мембраны ОРМ31К от рабочего давления

Для исходной мембраны марки ОРМ32КМселективность снижалась с 58 % при 6 атм до 38 % при 13 атм(рисунок 2). После модификации хитозаном селективность при 6 атмувеличилась до 67 %, оксидом азота (IV) – до 77 % при 6 атм и 62 % при 13 атм.

Таким образом, эффективность модификации зависела от типа исходной мембраны; в исследованном диапазоне давлений наибольшая селективность достигалась для ОРМ31К после обработки оксидом азота (IV) [5, 8, 9].

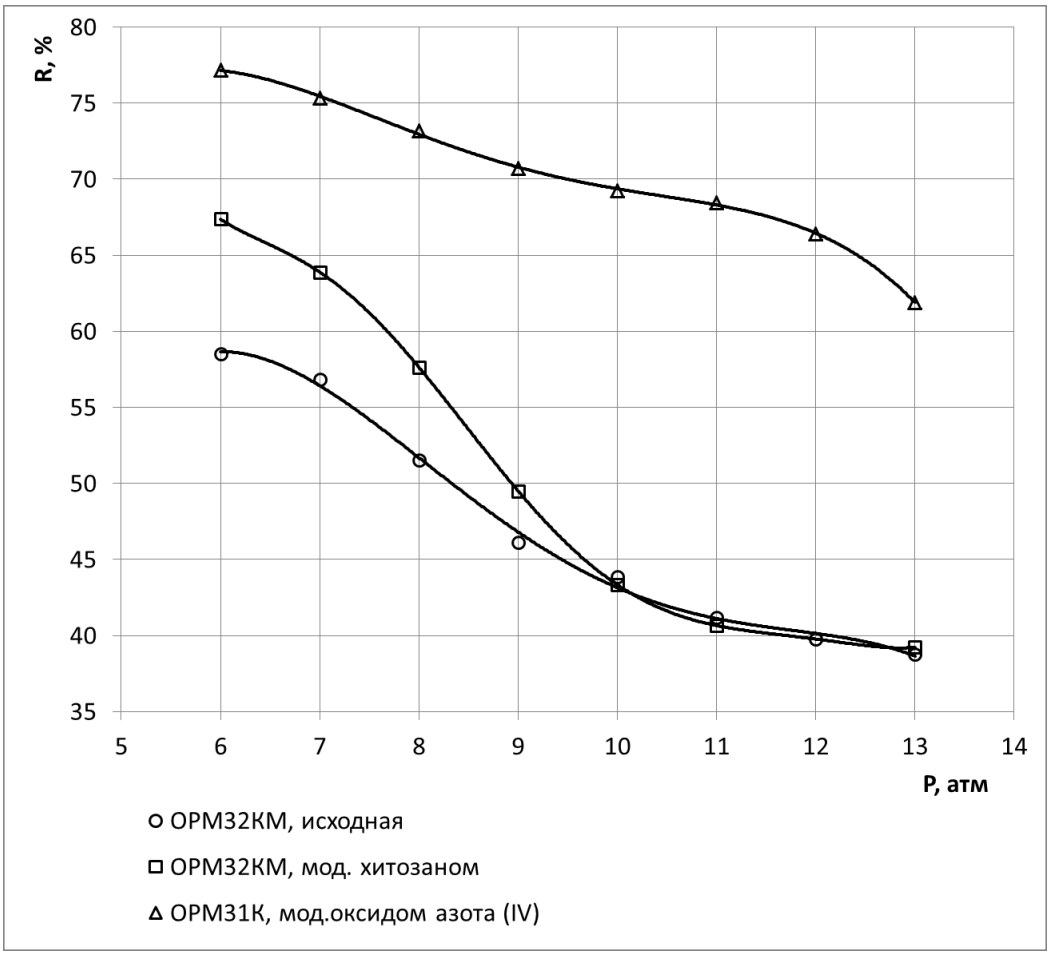

Рисунок 2 – Зависимость селективности мембраны ОРМ32КМ от рабочего давления

Изучение проницаемости показало, что для исходной мембраны ОРМ31К она увеличилась с 225 мл/(мин·м²) при 6 атм до 315 мл/(мин·м²) при 13 атм(рисунок 3). После нанесения хитозана соответствующие значения составляли 80 и 180 мл/(мин·м²), после обработки оксидом азота (IV) – 20 и 50 мл/(мин·м²).

Для исходной мембраны ОРМ32КМпроницаемость возрасла с 510 до 640 мл/(мин·м²)(рисунок 4). После модификации хитозаном она находилась в диапазоне от 98 до 250 мл/(мин·м²), а после обработки оксидом азота (IV) – от 30 до 98 мл/(мин·м²).

Для обеих мембран зафиксировано, что рост селективности сопровождался снижением проницаемости, что может быть связано с формированием дополнительного поверхностного слоя, создающего сопротивление переносу.

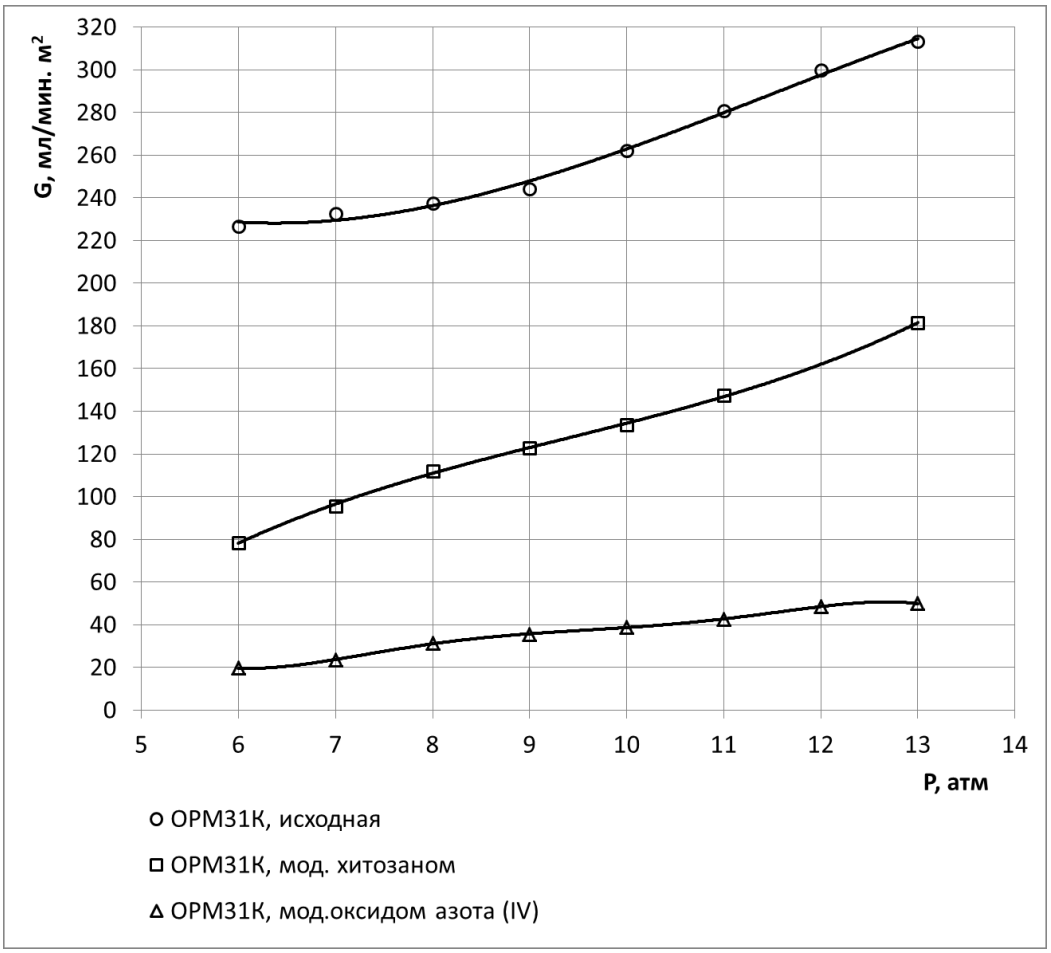

Рисунок 3 – Зависимость проницаемости мембраны ОРМ31К от рабочего давления

Влияние модификации на транспортные характеристики зависит от природы полимера, структуры исходной мембраны и условий модификации; подобные факторы учитываются при разработке композитных и хитозансодержащих мембран. В случае обработки оксидом азота (IV) изменение спектральных характеристик сопровождается заметным снижением потока, однако имеющиеся данные не позволяют количественно разделить вклад химических изменений поверхности и изменения сопротивления массопереносу.

Практический выбор модифицированной мембраны следует выполнять с учётом требуемой степени удаления фенола и допустимого снижения производительности. По совокупности представленных результатов наиболее высокая селективность достигнута для мембраны марки ОРМ31К после обработки оксидом азота (IV), однако этот вариант характеризуется наиболее низкой проницаемостью. Поэтому до практического внедрения необходимо дополнительно оценить стабильность характеристик, включая устойчивость поверхности к загрязнению, возможность регенерации при длительной эксплуатации.

Заключение

В результате сравнительных испытаний установлено, что модификация полисульфонных мембран хитозаном и обработкой оксидом азота (IV) повышают селективность по фенолу, одновременно снижая проницаемость.Таким образом, выбор способа обработки должен основываться на совместной оценке селективности и проницаемости. Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение устойчивости модифицированного слоя и эксплуатационных характеристик мембран в продолжительном цикле фильтрации.

Список литературы

1. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: приказ Федерального агентства по рыболовству от 26.05.2025 № 296.
2. ТарлеваА.Ф., Шептицкий В.А., Кузьмина В.В. Реакция различных систем организма рыб на фенол и его производные // Проблемы биологии продуктивных животных. 2018. С. 27–30.
3. Бусарев А.В., Селюгин А.С., Ермилова Е.Ю., Зиганшина А.С. Очистка фенолсодержащих стоков методом ультрафильтрации // Вестник технологического университета. 2025. Т. 28, № 4. С. 54–58.
4. Souza V.C., Quadri M.G.N. Organic-inorganic hybrid membranes in separation processes: A 10-year review // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2013. Vol. 30, № 4. P. 683–700.
5. Абдуллин И.Ш., Ибрагимов Р.Г., Парошин В.В., Зайцева О.В. Модификация композиционных мембран // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. С. 11–16.
6. Шайхиев И.Г., Свергузова С.В., Ушакова Н.А. и др. Хитин и хитозан из личинок Hermetiaillucens: получение, свойства и перспективы использования // Экономика строительства и природопользования. 2022. № 3(84). С. 138–148.
7. Лебедева О.А., Седелкин В.М., Потехина Л.Н. Технология получения и характеристики хитозановыхнанофильтрационных мембран // Известия высших учебных заведений. Серия «Химияихимическаятехнология». 2022. Т. 65, № 1. С. 58–65. DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6340.
8. YeszhanovA.B., Dosmagambetova S.S. Phenol solutions treatment by using hydrophobized track-etched membranes // Bulletin of the Karaganda University. Chemistry Series. 2020. № 3(99). P. 99–109.
9. КравецЛ.И., АлтыновВ.А., ЯрмоленкоМ.А. идр. Осаждение на поверхности трековых мембран гидрофобных полимерных покрытий из активной газовой фазы // Мембраны и мембранные технологии. 2022. Т. 12, № 2. С. 151–162.
10. Панов Ю.Т., Тарсов А.В., Лепешин С.А., Ермолаева Е.В. Полиамидные микрофильтрационные мембраны с улучшенными порометрическими

и прочностными свойствами // Современные наукоёмкие технологии. 2015. № 12-2. С. 258–262.