

Торайғыров университетінің  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
Торайғыров университета

---

# ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ ХАБАРШЫСЫ

Химия-биологиялық сериясы  
1997 жылдан бастап шығады



## ВЕСТНИК ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

Химико-биологическая серия  
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3544

---

№ 1 (2025)

Павлодар

# НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ Торайгыров университета

**Химико-биологическая серия**  
выходит 4 раза в год

---

## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,  
информационного агентства и сетевого издания  
№ KZ84VPY00029266

выдано  
Министерством информации и коммуникаций Республики Казахстан

**Тематическая направленность**  
публикация материалов в области химии, биологии, экологии,  
сельскохозяйственных наук, медицины

**Подписной индекс – 76134**

<https://doi.org/10.48081/ULYV8253>

---

### Бас редакторы – главный редактор

Ержанов Н. Т.  
*д.б.н., профессор*

Заместитель главного редактора  
Ответственный секретарь

Ахметов К. К., *д.б.н., профессор*  
Камкин В. А., *к.б.н., доцент*

### Редакция алқасы – Редакционная коллегия

|                          |                                                                        |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Яковлев Р.В.,            | <i>д.б.н., профессор (Российская Федерация);</i>                       |
| Титов С. В.,             | <i>доктор PhD;</i>                                                     |
| Касанова А. Ж.,          | <i>доктор PhD;</i>                                                     |
| Jan Micinski,            | <i>д.с.-х.н., профессор (Республика Польша);</i>                       |
| Surender Kumar Dhankhar, | <i>доктор по овощеводству,</i><br><i>профессор (Республика Индия);</i> |
| Шаманин В. П.,           | <i>д.с.-х.н., профессор</i><br><i>(Российская Федерация);</i>          |
| Азаренко Ю. А.,          | <i>д.с.-х.н., профессор</i><br><i>(Российская Федерация);</i>          |
| Омарова А. Р.            | <i>(технический редактор).</i>                                         |

---

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели  
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов  
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

**СЕКЦИЯ «ХИМИЯ»**

МРНТИ 61.51.91

<https://doi.org/10.48081/QLYT3387>**\*М. А. Баубекоев**ТОО «Компания Нефтехим LTD»,  
Республика Казахстан, г. Павлодар.ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1088-6229>\*e-mail: [baubekov1986@gmail.com](mailto:baubekov1986@gmail.com)**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕМБРАННЫХ  
БИОРЕАКТОРОВ И ДИСТИЛЛЯЦИИ ДЛЯ  
ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*В статье рассматривается использование мембранных биореакторов для очистки сточных вод нефтехимических предприятий, содержащих сложные органические и неорганические загрязнители, включая фенолы, углеводороды и тяжелые металлы. Анализируются различные типы мембранных биореакторов: погружённые, внешние, гибридные, аэробные и анаэробные. Эксперименты проводились с мембранными модулями из поливинилиденфторида с размером пор 0,04 мкм, что позволило эффективно удалять загрязняющие вещества при концентрации химического потребления кислорода до 4000 мг/л. Основными показателями эффективности очистки являлись концентрация взвешенных веществ и окислительно-восстановительный потенциал.*

*Погружённые мембранные биореакторы характеризуются высокой компактностью и энергоэффективностью, тогда как внешние установки обеспечивают более высокую производительность, что делает их оптимальными для очистки сильно загрязнённых сточных вод. Гибридные системы, объединяя преимущества обоих подходов, позволяют повысить универсальность технологий и снизить эксплуатационные затраты. Аэробные биореакторы показали высокую эффективность в удалении органических соединений, в то время как анаэробные дополнительно способствуют образованию биогаза, что снижает энергозатраты очистных процессов.*

*Особое внимание уделяется интеграции мембранных биореакторов с реверсивным электродиализом и мембранной дистилляцией. Такой комплексный подход позволяет восстанавливать до 96 % воды из сточных потоков. Предварительная фильтрация и корректировка водородного показателя значительно повышают эффективность мембранной дистилляции, обеспечивая извлечение до 75 % воды из концентрированных солевых растворов. Внедрение этих технологий открывает перспективы для создания безотходных производственных процессов и увеличения доли повторно используемой воды в промышленности.*

*Ключевые слова: Мембранные биореакторы, очистка сточных вод, нефтехимическая промышленность, химическая потребность в кислороде, гидравлическое время удержания, мембранная дистилляция.*

## **Введение**

Нефтехимическая промышленность до сих пор сталкивается с серьезными вызовами, связанными с управлением водными ресурсами и очисткой сточных вод. Как известно нефтеперерабатывающие заводы производят немалые объемы сточных вод, содержащие сложные органические и неорганические загрязнители, такие как нефтепродукты, фенолы, тяжелые металлы и другие токсичные вещества. Ввиду чего были выдвинуты инициативы и решения по управлению и регулированию качества водных ресурсов предприятий.

Регулирование качества сточных вод требует внедрения современных технологий фильтрации. Многие из применявшихся ранее методов постепенно утратили актуальность и не способны обеспечить необходимую степень очистки, соответствующую современным экологическим требованиям.

Сточные воды нефтехимических предприятий характеризуются широким спектром загрязнителей, включая углеводороды, фенолы, тяжелые металлы, азотсодержащие соединения и сульфиды. Для их очистки применяются [1, с. 3–4].

- Физико-химические методы: первичные и вторичные стадии разделения нефти и воды, такие как сепараторы API, системы флотации растворенным воздухом (DAF) и гидроциклоны.

- Биологическая очистка: традиционные активные илы, мембранные биореакторы (МБР), биореакторы последовательного действия (БПД) и биофильтры.

- Гибридные системы: комбинация биологических и физических процессов для повышения эффективности удаления загрязнителей.
- Третичные технологии: ультрафильтрация, обратный осмос, ионообмен и процессы электрохимической очистки.
- Продвинутые окислительные процессы: фотокаталитические системы, использование озона и суперокислителей.

### Материалы и методы

Современные технологии очистки сточных вод активно используют мембранные биореакторы (МБР), которые представляют собой высокоэффективные системы для устранения органических загрязнителей, взвешенных частиц и биологических примесей. Эти технологии объединяют процессы биологической очистки и мембранной фильтрации. Данные типы биореакторов зарекомендовали себя и в нефтепереработке ввиду глубокой очистки сточных вод от таких сложных загрязнителей, как фенолы, нефтепродукты и тяжелые металлы. Среди ключевых достоинств МБР можно отметить компактность, высокую эффективность очистки и возможность повторного использования очищенной воды, позволяющим играть ключевую роль в очистке сточных вод и соответствуй современным жестким стандартам [2, с. 2–3].

Таблица 1 – Общая характеристика биореакторов и их эффективность [3, с. 3]

| Тип сточных вод                            | Конфигурация биореактора             | Механизм работы                                            | Эффективность очистки                             |
|--------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Сточные воды НПЗ                           | Непрерывно перемешиваемый биореактор | Естественный микробный консорциум. Период: 225 дней        | Удаление 95% ХПК, 97.5% УВ                        |
| Синтетические нефтехимические сточные воды | Реактор МПД                          | Активный ил из городских очистных сооружений. HRT: 15 дней | Удаление ХПК: 59–88%, Hg: 76–90%, Cd: 96–98%      |
| Сточные воды НПЗ                           | Двухстадийный МПД                    | Использование метанола как косубстрата                     | Удаление 97.5% ХПК, полное удаление масел и жиров |
| Синтетические нефтяные сточные воды        | МБПД (модифицированный)              | Три параллельных реактора. HRT: 8, 16, 24 ч                | Удаление УВ > 97%                                 |
| Отходы нефти                               | Реактор МБР                          | Городской активный ил, полиуретановые губки. HRT: 12–15 ч  | Удаление ТРН: 70–85%                              |
| Сточные воды с месторождений               | БПБ (с подвижным слоем биопленки)    | Глиняная керамика с бионосителем. HRT: 10–36 ч             | Удаление ХПК: 74–77%                              |

Мембранные биореакторы классифицируются на несколько типов, каждый из которых адаптирован под специфические задачи. Погружённые мембранные биореакторы (Submerged MBR) характеризуются размещением мембран внутри биореактора. Вакуумное фильтрование снижает энергозатраты, а компактная конструкция делает их особенно подходящими для обработки сточных вод с низкой концентрацией загрязнений. Несмотря на это такие системы требуют интенсивной аэрации для предотвращения засорения мембран и поддержания их работоспособности, что продлевает срок эксплуатации.

Внешние мембранные биореакторы (Side-stream MBR) имеют иной подход: мембраны располагаются в отдельном модуле вне биореактора, а вода перекачивается через них с помощью насосов высокого давления. Такие особенности позволяют иметь более высокую производительность по сравнению с погружёнными системами, однако имеют в себе повышенные энергозатраты и необходимость регулярного обслуживания, что ограничивает их использование в условиях высокой стоимости эксплуатации.

Гибридные мембранные биореакторы (Hybrid MBR) сочетают преимущества как погружённых, так и внешних систем. Это позволяет адаптировать их под широкий спектр характеристик сточных вод. В связи с высокой производительностью и гибкостью, они эффективны для удаления органических и неорганических загрязнителей при одновременном снижении эксплуатационных расходов.

Аэробные мембранные биореакторы (Aerobic MBR) работают в условиях насыщения кислородом, что способствует ускоренной биологической деградации органических соединений и биологического азота. Это делает их идеальными для сточных вод с высоким содержанием органических веществ. Напротив, анаэробные мембранные биореакторы (Anaerobic MBR) оптимальны для обработки высококонцентрированных загрязнителей. Они также производят биогаз, что дополнительно снижает энергозатраты предприятия и делает эти системы особенно экономически выгодными для промышленного использования [2, с. 5–6].

Несмотря на растущее применение мембранных биореакторов (МБР) для очистки сточных вод, их эксплуатация сопровождается рядом проблем и неопределённостей. Примером может служить установка в Schilde, первая в странах Бенилюкса, которая продемонстрировала определённые сложности на этапе запуска. Система, рассчитанная на постоянный поток 230 м³/ч, столкнулась с техническими трудностями, связанными с недостаточной адаптацией технологии для средне- и крупномасштабных применений [3, с. 8–9].

Ключевыми проблемами эксплуатации МБР стали недостаточная эффективность предварительной обработки сточных вод, засорение защитных экранов и необходимость доработки автоматизации. Использование сит с отверстиями диаметром 1 мм не обеспечивало достаточной производительности из-за частых засоров, что потребовало замены на тканевые сита. Однако и они нуждались в регулярной ручной очистке, что указывало на недостаточный уровень автоматизации системы. Засорение экранов рециркуляции ила, вызванное агломерацией волокнистых материалов, потребовало модификации конструкции и внедрения низкочастотной рециркуляции для снижения содержания крупных частиц.

Автоматизация системы потребовала значительных улучшений. Первоначальная схема управления потоком пермеата, основанная на уровне жидкости в аэробном биореакторе, приводила к нестабильности фильтрации, что было решено с использованием измерений уровня в аноксическом биореакторе.

Для оценки эффективности различных типов МБР в работе рассматривались экспериментальные установки, включавшие системы управления потоком, мембранные модули из ПВДФ (поливинилиденфторид) с размером пор 0,04 мкм, а также устройства для аэрации, минимизирующие загрязнение мембран. Основные химические и физические параметры, такие как БПК, ХПК, концентрация взвешенных веществ (TSS) и окислительно-восстановительный потенциал (ORP) использовались для анализа. Условия экспериментов включали температуру в диапазоне 25–30 °C и концентрацию загрязнителей с ХПК до 4000 мг/л, при этом длительность каждого эксперимента составляла до 90 дней [4, с. 13–14].

Полученные результаты позволили объективно оценить эффективность работы каждой системы в различных условиях. Погружённые системы отличались низкими энергозатратами и компактностью, в то время как внешние системы обеспечили максимальную производительность. Гибридные и анаэробные биореакторы показали универсальность и надёжность для сложных задач очистки сточных вод, минимизируя экологические и экономические риски.

Таблица 2 – Основные загрязнители сточных вод нефтеперерабатывающих заводов. [5, с 2–3; 6, с. 6–7; 7, с. 3]

| Тип загрязнителя | Основные загрязнители                     | Потенциальные источники                 |
|------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Органические     | БТЕК (бензол, толуол, этилбензол, ксилол) | Сточные воды из переработки сырой нефти |

|                |                                                                             |                                                                                     |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Органические   | Фенолы                                                                      | Сточные воды из установок десульфурации и гидрокрекинга                             |
| Органические   | Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ)                            | Сточные воды от установок термического и каталитического крекинга                   |
| Органические   | Нафтенновые кислоты, метанол, кетоны, эфиры, поверхностно-активные вещества | Сточные воды из процессов переработки, содержащие химические добавки и растворители |
| Неорганические | Аммиак                                                                      | Сточные воды от аминных установок и стриппинг-башен                                 |
| Неорганические | Цианиды                                                                     | Сточные воды от термических процессов и резервуаров                                 |
| Неорганические | Тяжёлые металлы                                                             | Сточные воды от установок обессоливания и катализаторов                             |
| Неорганические | Сероводород, сульфиды, галогены                                             | Сточные воды из процессов гидрирования и резервуаров                                |

Дополнительно в исследовании рассматривается концептуальный процесс, основанный на результатах тестов мембранной дистилляции в лабораторных условиях. Таким образом целью работы является оценка возможности интеграции установок с биореакторами в нефтехимические предприятия.

Процесс включает фильтрационную установку и встроенный смеситель перед блоком мембранной дистилляции. Ожидаемое восстановление воды с использованием мембранной очистки сточных вод (реверсивный электродиализ + мембранная дистилляция) составляет около 96 % от общего объёма входящей воды.

Согласно предыдущим исследованиям, пилотная установка обратного электродиализа (ОЭД) способна восстанавливать около 85 % воды на входе в её поток сточных вод. Нынешние тесты показали, что мембранная дистилляция позволяет восстанавливать около 75 % воды из концентрированного солевого раствора, образующегося на выходе после обратного электродиализа, при использовании предварительной фильтрации и регулировки pH [8, с. 22–24].



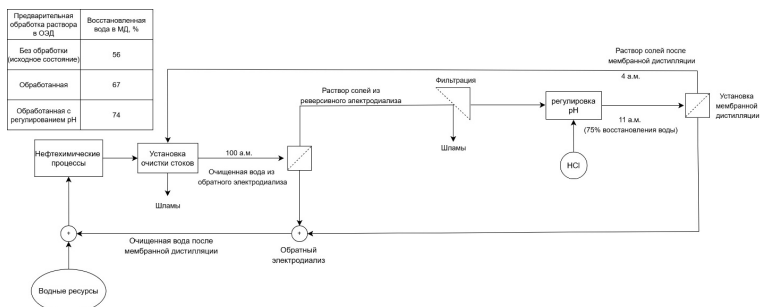


Рисунок 1 – Модель установки очистки сточных вод на основе мембранной дистилляции

## Результаты и обсуждение

Сравнение эффективности различных типов биореакторов основывалось на данных о способности удаления загрязнителей, таких как химическая потребность в кислороде (ХПК), общие углеводороды (ТРН), а также способность к удалению тяжёлых металлов и биологического азота. Стоит рассмотреть и оценку энергетической эффективности и устойчивости работы биореакторов при изменении состава загрязнителей.

Ниже представлена таблица с основными параметрами эффективности аэробных, анаэробных и гибридных биореакторов, полученными на основе экспериментальных данных.

Таблица 3 – Сравнение эффективности биореакторов [1, с. 11; 2, с. 3; 9, с. 2–3].

| Тип биореактора | Основные условия эксплуатации                   | Эффективность удаления загрязнений                  | Преимущества                                                              |
|-----------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Аэробный MBR    | HRT: 10-15 часов,<br>Температура: 25-30°C       | COD: 90–95 %, TPN: >97 %, NH <sub>4</sub> -N: >95 % | Высокие показатели удаления органических загрязнений, энергоэффективность |
| Анаэробный MBR  | HRT: 30–40 часов,<br>Температура: 35-37°C       | COD: 80–90 %, TPN: 95 %, Биогаз: 90–120 л/день      | Производство биогаза, подходит для высококонцентрированных сточных вод    |
| Гибридный MBR   | HRT: 15–20 часов,<br>3-ступенчатая конфигурация | COD: >93 %, TPN: >95 %, Тяжёлые металлы: 80 %       | Гибкость в конфигурации, подходит для различных типов загрязнителей       |

Также в ходе анализа результатов работы были определены зависимости эффективности удаления загрязнений от времени гидравлического удержания. Из результатов можно отметить улучшение глубины очистки с увеличением времени удержания, а именно химическую потребность в кислороде и концентрации взвешенных веществ.

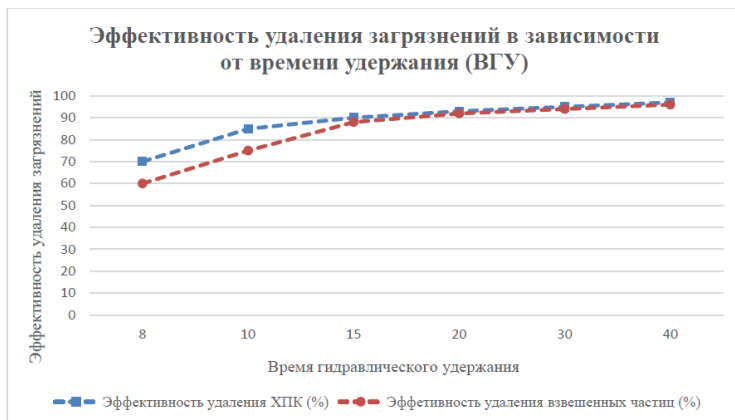


Рисунок 2 –Эффективность удаления загрязнений в зависимости от времени удержания (HRT)

График иллюстрирует зависимость эффективности удаления загрязнений от времени гидравлического удержания (ВГУ). На графике представлены линии, отображающие эффективность удаления ХПК и взвешенных веществ в зависимости от времени удержания. Можно наблюдать, что с увеличением времени удержания эффективность удаления загрязнений возрастает, достигая значительных показателей для всех исследованных параметров. Из результатов можно отметить улучшение глубины очистки с увеличением времени удержания, а именно химическую потребность в кислороде и концентрации взвешенных веществ [1, с. 10–11; 4, с. 13–14; 10, с. 2].

Все типы МБР демонстрируют высокую эффективность удаления загрязнений, таких как ХПК, ТРН и тяжёлые металлы, при этом уровень очистки достигает более 90% при оптимальных условиях эксплуатации.

Особое внимание уделяется гибридным системам, которые объединяют мембранную фильтрацию с реверсивным электродиализом (EDR). Такие технологии позволяют достигать уровня восстановления воды до 96 %,

создавая возможности для достижения целей безотходного производства и повторного использования воды. Экономическая и экологическая выгода этих систем также очевидна: применение анаэробных мембранных биореакторов способствует снижению энергозатрат за счёт генерации биогаза, в то время как аэробные системы обеспечивают стабильно высокую производительность.

### **Выводы**

Проведённое исследование показало, что мембранные биореакторы различных типов – погружённые, внешние, гибридные, аэробные и анаэробные – эффективно удаляют органические и неорганические загрязнители из сточных вод нефтехимических предприятий. Эксперименты подтвердили, что погружённые системы обеспечивают компактность и низкое энергопотребление, тогда как внешние установки демонстрируют высокую производительность. Гибридные технологии позволяют повысить эффективность очистки при оптимизации эксплуатационных затрат.

Аэробные биореакторы обеспечивают глубокую очистку органических соединений, в то время как анаэробные установки дополнительно вырабатывают биогаз, что снижает затраты на энергообеспечение процессов. Интеграция мембранных биореакторов с реверсивным электродиализом и мембранной дистилляцией позволяет восстанавливать до 96 % воды, а применение предварительной фильтрации и корректировки pH повышает эффективность мембранной дистилляции, обеспечивая извлечение до 75 % воды из концентрированных солевых растворов.

Полученные результаты подтверждают возможность значительного сокращения потребления пресной воды за счёт её повторного использования, что особенно актуально для нефтехимической промышленности.

### **Список использованных источников**

1 **Al-Asheh, S., Banat, F., Al-Makhadmeh, A., Alsawalha, R.** Membrane bioreactor for wastewater treatment : A review. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 2021, Vol. 4, Article No. 100109.

2 **Le-Clech, P.** Membrane bioreactors and their uses in wastewater treatments. Appl. Microbiol. Biotechnol., 2010, Vol. 88, No. 5, pp. 1253–1260.

3 **Melin, T., Jefferson, B., Bixio, D., Thoeye, C., De Wilde, W., De Koning, J., van der Graaf, J., Wintgens, T.** Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse. Desalination, 2006, Vol. 187, pp. 271–282.

4 **Llop, A., Pocurull, E., Borrull, F.** Evaluation of the Removal of Pollutants from Petrochemical Wastewater Using a Membrane Bioreactor Treatment Plant. *Water Air Soil Pollut.*, 2009, Vol. 197, pp. 349–359.

5 **Mohd Jahir Khan, Agung Wibowo, Zoheb Karim, Pattaraporn Posoknistakul, Babasaheb M. Matsagar, Kevin C.-W. Wu, Chularat Sakdaronnarong.** Wastewater Treatment Using Membrane Bioreactor Technologies: Removal of Phenolic Contaminants from Oil and Coal Refineries and Pharmaceutical Industries. *Polymers*, 2024, Vol. 16, No. 443, pp. 1–15.

6 **Kuyukina, M. S., Krivoruchko, A. V., Ivshina, I. B.** Advanced Bioreactor Treatments of Hydrocarbon-Containing Wastewater. *Appl. Sci.*, 2020, Vol. 10, No. 831, pp. 1–15.

7 **Khaing, T. H., Li, J., Li, Y., Wai, N., Wong, F.-S.** Feasibility study on petrochemical wastewater treatment and reuse using a novel submerged membrane distillation bioreactor. *Desalination*, 2006, Vol. 196, pp. 22–28.

8 **Santos, P. G., Scherer, C. M., Fisch, A. G., Rodrigues, M. A. S.** Petrochemical wastewater treatment: Water recovery using membrane distillation. *Journal of Cleaner Production*, 2020, Vol. 254, Article No. 120109.

9 **Malamisa, S., Katsoua, E., Di Fabioa, S., Frisonb, N., Cecchia, F., Fatonea, F.** Treatment of petrochemical wastewater by employing membrane bioreactors: A case study of effluents discharged to a sensitive water recipient. *Desalination*, 2010, Vol. 261, pp. 1–10.

10 **Huang, S., Pooi, C. K., Shi, X., Varjani, S., Ng, H. Y.** Performance and process simulation of membrane bioreactor (MBR) treating petrochemical wastewater. *Journal of Environmental Management*, 2021. – Vol. 281, Article No. 111795.

Поступило в редакцию 20.01.25.

Поступило с исправлениями 28.01.25.

Принято в печать 08.03.25.

*\*М. А. Баубеков*

ЖШС «Компания Нефтехим LTD»,  
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

20.01.25 ж. баспаға түсті.

28.01.25 ж. түзетулерімен түсті.

08.03.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

## **МҰНАЙХИМИЯ ӨНЕРКӘСІБІНІҢ АҒЫНДЫ СУЛАРЫН ТАЗАРТУ ҮШІН МЕМБРАНАЛЫҚ БИОРЕАКТОРЛАР МЕН ДИСТИЛЛЯЦИЯНЫҢ ТИІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ**

*Мақалада мұнай-химия кәсіпорындарының ағынды суларын тазарту үшін мембраналық биореакторларды қолдану қарастырылады. Бұл сулар құрамында фенолдар, көмірсутектер және ауыр металдар сияқты күрделі органикалық және бейорганикалық ластаушы заттар бар. Мембраналық биореакторлардың әртүрлі түрлері талданады: батырылған, сыртқы, гибридті, аэробты және анаэробты. Эксперименттер тесіктерінің өлшемі 0,04 мкм болатын поливинилиденфторидтен жасалған мембраналық модульдерде жүргізілді, бұл химиялық оттегі қажеттілігі 4000 мг/л-ге дейінгі ластаушы заттарды тиімді жоюға мүмкіндік берді. Тазарту тиімділігінің негізгі көрсеткіштері ретінде суспензияланған заттардың концентрациясы және тотығу-тотықсыздану потенциалы қарастырылды.*

*Батырылған мембраналық биореакторлар ықшамдылығымен және энергия тиімділігімен ерекшеленеді, ал сыртқы қондырғылар жоғары өнімділікке ие болып, күшті ластанған ағынды суларды тазартуда оңтайлы шешім болып табылады. Гибридті жүйелер екі әдістің артықшылықтарын біріктіре отырып, технологияның әмбебаптығын арттырып, пайдалану шығындарын азайтуға мүмкіндік береді. Аэробты биореакторлар органикалық қосылыстарды жоюда жоғары тиімділік көрсетті, ал анаэробты жүйелер қосымша биогаз түзілуіне ықпал етіп, тазарту процестерінің энергия шығындарын төмендетеді.*

*Мембраналық биореакторларды кері электродиализ және мембраналық дистилляция әдістерімен біріктіруге ерекше назар аударылады. Мұндай кешенді тәсіл ағынды сулардан 96 %-ға дейінгі суды қалпына келтіруге мүмкіндік береді. Алдын ала сүзу және сутегі көрсеткішін түзету мембраналық дистилляцияның тиімділігін едәуір арттырып, тұзды ерітінділерден судың 75 %-ға дейінгі мөлшерін алуға жағдай жасайды. Бұл технологияларды енгізу қалдықсыз өндіріс құруға және өнеркәсіпте суды қайта пайдалану үлесін арттыруға жаңа мүмкіндіктер ашады.*

*Кілтті сөздер: Мембраналық биореакторлар, ағынды суларды тазарту, мұнай-химия өнеркәсібі, химиялық оттегіні қажетсіну, гидравликалық ұсталу уақыты, мембраналық дистилляция.*

\*M. A. Baubekov

LLP «Neftekhim», Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 20.01.25.

Received in revised form 28.01.25.

Accepted for publication 08.03.25.

## EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF MEMBRANE BIOREACTORS AND DISTILLATION FOR THE TREATMENT OF WASTEWATER FROM THE PETROCHEMICAL INDUSTRY

*The article examines the use of membrane bioreactors for treating wastewater from petrochemical enterprises, which contain complex organic and inorganic pollutants such as phenols, hydrocarbons, and heavy metals. Various types of membrane bioreactors are analyzed, including submerged, external, hybrid, aerobic, and anaerobic systems. Experiments were conducted using membrane modules made of polyvinylidene fluoride with a pore size of 0.04  $\mu\text{m}$ , allowing efficient removal of contaminants at a chemical oxygen demand concentration of up to 4000 mg/L. The key performance indicators of the treatment process included suspended solids concentration and redox potential.*

*Submerged membrane bioreactors are characterized by their compactness and energy efficiency, while external systems offer higher performance, making them optimal for treating heavily polluted wastewater. Hybrid systems combine the advantages of both approaches, enhancing technological versatility and reducing operational costs. Aerobic bioreactors have demonstrated high efficiency in removing organic compounds, whereas anaerobic systems contribute to biogas generation, reducing energy costs in the treatment process.*

*Special attention is given to the integration of membrane bioreactors with reverse electrodialysis and membrane distillation methods. This comprehensive approach enables the recovery of up to 96 % of water from wastewater streams. Pre-filtration and pH adjustment significantly enhance the efficiency of membrane distillation, allowing the recovery of up to 75 % of water from concentrated saline solutions. The implementation of these technologies opens new opportunities for developing zero-waste production and increasing water reuse in industrial processes.*

*Keywords: Membrane bioreactors, wastewater treatment, petrochemical industry, chemical oxygen demand, hydraulic retention time, membrane distillation.*

Теруге 12.03.2025 ж. жіберілді. Басуға 26.03.2025 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

3,89 МБ RAM

Шартты баспа табағы 12,72.

Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген А. К. Темиргалинова

Корректорлар: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4390

Сдано в набор 12.03.2025 г. Подписано в печать 26.03.2025 г.

Электронное издание

3,89 МБ RAM

Усл. п. л. 12,72. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка А. К. Темиргалинова

Корректоры: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4390

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

Павлодар мемлекеттік университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

8 (7182) 67-36-69

e-mail: [kereku@tou.edu.kz](mailto:kereku@tou.edu.kz)

[www.vestnik-cb.tou.edu.kz](http://www.vestnik-cb.tou.edu.kz)