

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ
И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА
ЭЛЕКТРОМЕМБРАННЫХ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ
ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД
ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И АПАВ**

**И. В. Хорохорина, С. И. Лазарев,
О. С. Филимонова, К. В. Брянкин**

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический
университет», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: мембранные методы; очистка; поверх-
ностно-активные вещества; тяжелые металлы.

Аннотация: Рассмотрено применение баромембранных и электробаромембранных методов в технологических схемах очистки промышленных сточных вод от ионов металлов и анионных поверхностно-активных веществ. Показано эффективное сочетание баромембранных методов с электронанофильтрационным способом очистки. Предложена методика и выполнен расчет экономической эффективности разработанных инженерных схем очистки сточных вод с применением электромембранных методов.

Введение

В настоящее время из-за урбанизации и индустриализации некоторые загрязняющие вещества и их производные попадают в водную среду. Большая часть этих загрязнений приходится на органические вещества с низкими концентрациями. Несмотря на этот факт, они очень токсичны для человека и окружающей среды.

Деятельность промышленных предприятий влечет за собой образование большого количества сточных вод после технологических процессов производства. Сброс таких стоков без необходимой очистки приводит к ухудшению состояния очистных сооружений, загрязнению водоемов,

Хорохорина Ирина Владимировна – доктор технических наук, доцент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», e-mail: kotelnikovirina@yandex.ru; Лазарев Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика»; Филимонова Ольга Сергеевна – ассистент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; Брянкин Константин Вячеславович – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химические технологии», ТамбГТУ, Тамбов, Россия.

гибели водной экосистемы, а также негативно сказывается на здоровье человека.

В условиях нехватки воды на каждом континенте почти у 40 % населения мира возникла необходимость в разработке систем с максимальной эффективностью для обеззараживания сточных вод и их повторного использования.

Несмотря на то что мембранные технологии не являются новым изобретением, различная природа и сложный состав сточных вод создают возможности для дальнейших улучшений с точки зрения эффективности процесса. Требования к материалоемкости оборудования, энергии и качества пермеата [1 – 3]. Однако существует постоянная модификация мембранных модулей и мембранных элементов для снижения загрязнения мембран, что является серьезной проблемой для мембранных процессов [4]. Возможность комбинирования двух или более мембранных процессов друг с другом или с другими видами технологий, такими как коагуляция или адсорбция, также постоянно изучается, разрабатывается и применяется на многих очистных сооружениях [5].

Поэтому одним из определяющих направлений снижения отрицательного воздействия промышленных предприятий на окружающую среду является эффективная очистка сточных вод.

Среди основных источников загрязнения сточных вод ионами тяжелых металлов отметим гальваническое производство. Помимо этого, такие сточные воды могут содержать большое количество поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые используются в гальванике для промывки изделий после процессов нанесения покрытий. Значение pH данных стоков может находиться в диапазоне от сильноокислых до сильнощелочных [6, 7].

Один из наиболее широко используемых методов удаления тяжелых металлов из гальванических сточных вод – химическое осаждение. Данный метод дешев и прост в эксплуатации, но его основным недостатком является низкая эффективность очистки.

Цель работы – исследование технологического оформления и экономической оценки мембранных методов в процессах очистки промышленных сточных вод от ионов тяжелых металлов и ПАВ.

Оценка экономической эффективности разработанных схем очистки сточных вод

На смену традиционным методам очистки сточных вод приходят более эффективные электробаромембранные методы, позволяющие повысить экологическую и экономическую рентабельность процесса.

На рисунке 1 представлена технологическая схема очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов с оборотным водоснабжением.

Кислотно-щелочные сточные воды и технологические растворы, содержащие катионы металлов, поступают в накопитель-усреднитель 1, где регулируются показатели концентрации. Через фильтр механической очистки разделяемый раствор насосом нагнетается в двухкамерный реактор с барботирующим устройством 4. Растворы реагентов для нейтрализации



Рис. 1. Схема очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов:

1 – накопитель-усреднитель; 2, 3 – емкости растворов-нейтрализаторов; 4 – реактор с барботирующим устройством; 5 – тонкослойный осадитель; 6 – шламовая емкость; 7 – накопитель осветленных вод; 8 – каскад баромембранных модулей; 9 – каскад электронанофильтрационных модулей; 10 – накопитель фильтрата [8]

и обработки стоков порциями поступают из емкостей 2 и 3 в реактор. Пермеат (очищенный раствор) направляется на повторное использование в технологический процесс. Ретентат концентрируется до заданных параметров и отводится в емкость 4.

Затем под действием высоконапорного насоса разделяемый раствор направляется на тонкослойный фильтр 5, где происходит отделение твердой фазы, образовавшейся в ходе нейтрализации стоков, в виде шлама. Такой шлам выводится в шламовую емкость 6 для дальнейшей переработки.

Из накопителя 7 разделяемый раствор нагнетается на каскад баромембранных модулей 8. В них происходит разделение раствора на пермеат (очищенный раствор, который может использоваться для технологических нужд), и ретентат – концентрированный раствор. Ретентат насосом направляется на каскад электронанофильтрационных модулей 9, где происходит его концентрирование до заданных параметров.

Очищенная таким способом вода соответствует нормативным требованиям по сбросу в городскую систему канализации и требованиям при организации оборотного водоснабжения на производстве.

Ранее для обезвреживания сточных вод, содержащих ПАВ, применялись биологические методы очистки, но с развитием синтетических поверхностно-активных веществ с более высокой активностью были разработаны физико-химические методы, такие как коагуляция и флокуляция, окисление влажным воздухом, озонирование, фотокаталитическое разложение и др. [9, 10].

Мембранные методы по сравнению с традиционными имеют ряд преимуществ, таких как низкие энергозатраты, безреагентность процесса. Ультрафильтрация – перспективный метод обезвреживания жидких отходов, позволяющий задерживать микрочастицы, такие как вирусы, бактерии, органические соединения, а также хорошо зарекомендовавший себя для очистки сточных вод, содержащих анионные ПАВ (АПАВ).

Схема очистки сточных вод от АПАВ с повторным использованием воды в технологическом процессе и их концентрированием показана на рис. 2.

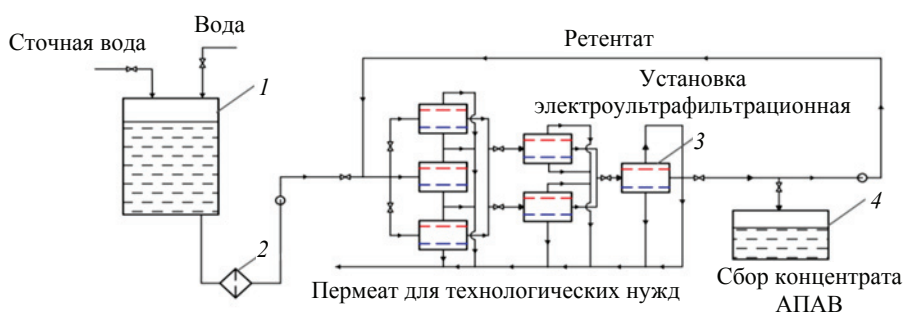


Рис. 2. Схема очистки сточных вод от анионных поверхностно-активных веществ:
 1 – проточный усреднитель; 2 – фильтр механической очистки воды;
 3 – каскад электроультрафильтрационных модулей; 4 – емкость для концентрата [8]

Сточные воды и технологические растворы, содержащие АПАВ, поступают в усреднитель 1 для регулирования параметров по значениям рН и концентрации. Пройдя фильтр механической очистки 2, служащий для задержания крупных частиц от 0,1 до 1 мм, разделяемый раствор насосом нагнетается на каскад электромембранных модулей 3. Пермеат (очищенный раствор) направляется на повторное использование в технологический процесс. Ретентат концентрируется до заданных параметров и отводится в емкость 4.

Для проведения оценки экономической эффективности разработанных инженерных схем очистки сточных вод взяты стоки двух разных видов с предприятия ОАО «Тамбовполимермаш». Данные сточные воды содержат тяжелые металлы после процесса латунирования и ПАВ после мойки изделий (табл. 1).

Таблица 1

Состав сточных вод ОАО «Тамбовполимермаш»

Раствор	Состав	Концентрация, г/л	рН
Сточные воды гальванических производств от процессов: латунирования	Сульфат меди	0,5...1,5	4,5...5,5
	Сульфат цинка	3,0...4,5	
	Калий пироглосфорнокислый	15...25	
	Кислота борная	15...17	
	Аммоний хлористый	3,5...4,5	
электрохимического обезжиривания	Натр С едкий	7...17	6,5...7,0
	Лаурилсульфат натрия	7...17	
	Сода кальцинированная	7...17	
	Синтаמיד-5	1,0...1,5	

Для расчета экономической эффективности технологических схем очистки сточных вод с повторным использованием воды в технологическом процессе и концентрированием целевого компонента предложена следующая методика.

Сточные воды гальванической линии, содержащие катионы металлов и ПАВ, очищаются традиционными реагентными методами на собственных очистных сооружениях завода. Очищенная вода отводится в городскую канализацию. Сброс контролируется ООО «РКС-Тамбов». За утилизацию шлама от реагентной очистки предприятие вносит плату за размещение отходов. Себестоимость очистки 1 тонны сточных вод по данным завода составляет 187 руб. Объем стоков гальванического цеха в месяц варьируется в пределах 6000 тонн (среднесуточный объем ~ 280 тонн). Рабочий режим предприятия: 1 смена, 22 рабочих дня в месяц. Производительность электробаромембранного оборудования составляет примерно 250 тонн технологических растворов в сутки, что удовлетворяет потребностям предприятия. Расчет затрат на очистку сточных вод ОАО «Тамбовполимермаш» при внедрении электробаромембранного оборудования в технологические схемы очистки сточных вод гальванического цеха (в ценах 2022 г.) представлен в табл. 2.

Современное электробаромембранное оборудование позволяет выделять ценные компоненты из сточных вод и концентрировать ретентат. Поэтому для более рационального использования отходов предприятия рассмотрена возможность продажи концентрата.

Для расчета прибыли от продажи концентрата осадка, содержащего ценные компоненты, используем формулу

$$\Pi = C_{\text{рын}} - C_{\text{полн}}, \quad (1)$$

где Π – прибыль от продажи 1 тонны концентрата, р.; $C_{\text{рын}}$ – рыночная цена за 1 тонну концентрата, р.; $C_{\text{полн}}$ – полная себестоимость 1 тонны концентрата, р.

Таблица 2

Расчет затрат на очистку сточных вод ОАО «Тамбовполимермаш»

Издержки	Металлы		ПАВ	
	1 т / р.	в мес. / р.	1 т / р.	в мес. / р.
Химические реагенты	38	171 000	18	27 000
Электроэнергия	74	333 000	28	42 000
Оклад персонала	14	63 000	14	21 000
Содержание мембранного оборудования	1	4 500	1	1 500
Амортизация	11	49 500	3	4500
Себестоимость	138	621 000	50	136 500

Расчет суммы платежа за размещение отходов

$$П_{\text{лим.отх}} = \sum_{i=1}^n Н_{\text{баз}} Т_{\text{факт}} K_{\text{экол}} K_{\text{инф}} K_{\text{расп}}, \quad (2)$$

где $Н_{\text{баз}}$ – базовый норматив платы за размещение 1 т отходов i -го вида в пределах нормативных лимитов, р./т, $Т_{\text{факт}}$ – фактическое количество размещенных отходов i -го вида в пределах нормативных лимитов, т; $K_{\text{экол}}$ – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния почв в конкретном регионе, $K_{\text{экол}} = 2$ (для ЦЧР); $K_{\text{инф}}$ – коэффициент, учитывающий уровень инфляции в 2022 г., $K_{\text{инф}} = 4$; $K_{\text{расп}}$ – коэффициент месторасположения объекта размещения отходов, $K_{\text{расп}} = 0,3$ (так как объект размещения отходов расположен на территории завода).

Уменьшение суммы платы за производственные отходы после внедрения проекта: экономия в сумме платы за размещение отходов $\Delta П_3$ находится по формуле

$$\Delta П_3 = П_{\text{отх}}^{\text{баз}} - П_{\text{отх}}^{\text{мемб}}, \quad (3)$$

где $П_{\text{отх}}^{\text{баз}}$, $П_{\text{отх}}^{\text{мемб}}$ – плата за выбросы загрязняющих веществ соответственно при существующей технологии очистки и внедрении мембранной технологии, р.

По данным завода плата за размещение отходов $П_{\text{раз.отх}}$ составляет в среднем за год 15 745 р.

Тогда экономия за год от внедрения программы составит

$$\mathcal{E} = П_{\text{лим.отх}} - П_{\text{разм.отх}}. \quad (4)$$

Используя доходный подход в расчете экономической эффективности проекта электробаромембранной очистки технологических растворов на заводе, рассчитаем:

– денежный поток за первый год реализации проекта [11]

$$ДП_1 = П_{\text{конц}} + \mathcal{E} + Р_{\text{ст.орг}} + П_{\text{един}}, \quad (5)$$

где $П_{\text{конц}}$ – прибыль от реализации всего объема концентрата за год, р.; \mathcal{E} – экономия в сумме платы за размещение отходов, руб.; $Р_{\text{ст.орг}}$ – расходы на сторонние организации, утилизирующие осадок сточных вод, р.; $П_{\text{един}}$ – единовременная прибыль от реализации всего объема концентрата за базовый год, р.;

– индекс доходности, анализируя соотношения суммы приведенных экономических эффектов к величине приведенных капитальных вложений [11]:

$$ИД = \frac{1}{В_{\text{доп}}} \sum_{i=1}^n ДП_1 \frac{1}{(1+H)^i}, \quad (6)$$

где H – норма дисконта 11 %, обычно принимается на уровне среднего банковского процента, %; $В_{\text{доп}}$ – дополнительные капиталовложения, р.;

– рентабельность продукции

$$P_{\text{прод}} = \frac{100 \cdot \Pi}{C_{\text{полн}}} ; \quad (7)$$

– чистый дисконтированный доход

$$\text{ЧДД} = \sum_{i=1}^n \text{ДП}_i \frac{1}{(1+H)^i} V_{\text{доп}} ; \quad (8)$$

– срок окупаемости капитальных вложений – период, в течение которого капитальные вложения окупятся приростом прибыли, вызванной данными капитальными вложениями,

$$C_{\text{окуп}} = \frac{KB_{\text{доп}}}{\sum_{i=1}^K \text{ДП}_i \frac{1}{(1+H)^i}} , \quad (9)$$

где K – число шагов расчета.

В таблице 3 представлены результаты расчета экономической эффективности технологических схем очистки сточных вод с оборотным водоснабжением.

При расчете установлено, что индекс доходности больше 1, то есть внедрение электробаромембранного оборудования в технологическую схему очистки сточных вод гальванических производств целесообразно. Срок окупаемости будет располагаться между вторым и третьим годами существования проекта, что доказывает его рентабельность.

Таблица 3

Результаты расчета экономической эффективности технологических схем очистки сточных вод с оборотным водоснабжением

Сравниваемый параметр расчета	Сточные воды	
	АПАВ	Металлы
Цена на рынке концентрата	3600 р./т	9600 р./т
Класс опасности отходов	4	1
Плата за размещение отходов	635,9 р./т	4452,4 р./т
Общая стоимость платы за размещение отходов, $\Pi_{\text{лим. отх. р.}}$	1028	6578
Δ , р.	– 8139*	
ИД	1,34	
$P_{\text{прод}}$	45,67	
ЧДД	5 170 032	
$C_{\text{окуп}}$	2,6	

* Знак «–» выражает снижение расходов на очистку сточных вод и уменьшение платы за размещение отходов.

Выводы

Разработано технологическое оформление процесса очистки промышленных сточных вод от ионов металлов и анионных поверхностно-активных веществ с применением баромембранных и электромембранных методов. Показано, что применение мембранных методов позволяет повысить эффективность очистки промышленных растворов.

Предложена методика и проведен расчет экономической эффективности технологических схем очистки сточных вод с повторным использованием воды в технологическом процессе и концентрированием целевого компонента с применением мембранных методов. Проведенный экономический анализ по разработанной методике показал рентабельность предложенного проекта внедрения электробаромембранного оборудования в технологические схемы очистки сточных вод гальванических производств.

Список литературы

1. Хорохорина, И. В. Особенности ультрафильтрационной очистки сточных вод от лаурилсульфата натрия / И. В. Хорохорина, С. И. Лазарев, О. С. Филимонова, А. А. Орлов, М. И. Михайлин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2021. – № 4(82). – С. 48 – 55. doi: 10.17277/voprosy.2021.04.pp.048-055
2. Медведева, В. С. Исследование вариантов схем оборотного водоснабжения и очистки сточных вод и предприятий со щелочными стоками / В. С. Медведева // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований : материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Геонауки – 2020», 21 – 25 мая 2020, г. Иркутск. – Иркутск, 2020. – С. 87 – 91.
3. Вилкова, Н. Г. Очистка сточных вод от веществ различной химической природы методом адсорбционного концентрирования / Н. Г. Вилкова, С. И. Мишина // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 2(39). – С. 163 – 173.
4. Хорохорина, И. В. Мембранные технологии – экологичные способы очистки сточных вод / И. В. Хорохорина, С. И. Лазарев, С. М. Бидуля // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2021. – № 3(81). – С. 37 – 43. doi: 10.17277/voprosy.2021.03.pp.037-043
5. Дудоров, В. Е. Методы очистки сточных вод, виды очистных сооружений и инновации в области очистки сточных вод / В. Е. Дудоров, Д. Н. Хисматулина, Э. Р. Исхакова // Наука среди нас. – 2019. – № 4 (20). – С. 43 – 48.
6. Виноградов, С. С. Экологически безопасное гальваническое производство / С. С. Виноградов ; под ред. В. Н. Кудрявцева. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Глобус, 2002. – 352 с. (Приложение к журналу «Гальванотехника и обработка поверхности»).
7. Извлечение цинка, меди, никеля и кобальта из сточных вод гальванических производств методом электронанофильтрации / С. И. Лазарев, И. В. Хорохорина, К. В. Шестаков, Д. С. Лазарев // Журнал прикладной химии. – 2021. – Т. 94, Вып. 8. – С. 1059 – 1064.
8. Хорохорина, И. В. Развитие научно-практических основ процессов электробаромембранной очистки и концентрирования промышленных растворов химических, нефтеперерабатывающих и металлообрабатывающих производств : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.03 / Хорохорина Ирина Владимировна. – Тамбов, 2021. – 407 с.
9. Поварова, Л. В. Анализ методов очистки нефтесодержащих сточных вод / Л. В. Поварова // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2018. – № 1. – С. 189 – 205.

10. Сауткина, Т. Н. Обзор безреагентных методов очистки воды / Т. Н. Сауткина, Е. В. Чеснокова, А. Ю. Рогаткин // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2019. – № 4(37). – С. 239 – 242.

11. Эколого-экономические расчеты : учеб. пособие / Т. А. Дмитриовская, В. С. Громова, О. А. Ткаченко. Орел : ОрелГТУ, 2004. – 47 с.

References

1. Khorokhorina I.V., Lazarev S.I., Filimonova O.S., Orlov A.A., Mikhailin M.I. [Features of ultrafiltration wastewater treatment from sodium lauryl sulfate], *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2021, no. № 4 (82), pp. 48-55. doi: 10.17277/voprosy.2021.04.pp.048-055 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Medvedeva V.S. [Study of variants of schemes for recycling water supply and wastewater treatment and enterprises with alkaline effluents], *Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopayemykh i metody geologicheskikh issledovaniy : materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Geonauki – 2020"* [Geology, prospecting and exploration of minerals and methods of geological research : materials of the International Scientific and Technical Conf. "Geosciences – 2020"], May 21-25, 2020, Irkutsk. – Irkutsk, 2020. – pp. 87-91. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Vilkova N.G., Mishina S.I. [Wastewater treatment from substances of various chemical nature by the method of adsorption concentration], *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction], 2019, no. 2(39), pp. 163-173. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Khorokhorina I.V., Lazarev S.I., Bidulya S.M. [Membrane technologies – eco-friendly methods of wastewater treatment], *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2021, no. 3(81), pp. 37-43. doi: 10.17277/voprosy.2021.03.pp.037-043. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Dudorov V.E., Hismatulina D.N., Iskhakova E.R. [Methods of wastewater treatment, types of wastewater treatment plants and innovations in the field of wastewater treatment], *Nauka sredi nas* [Science among us], 2019, no. 4 (20), pp. 43-48. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Vinogradov S.S.; Kudryavtsev V.N. (Ed.). [Environmentally safe electroplating production], Moscow: Globus, 2002. 352 p. (Appendix to the journal "Electroplating and surface treatment"). (In Russ.)

7. Lazarev S.I., Khorokhorina I.V., Shestakov K.V., Lazarev D.S. [Extraction of zinc, copper, nickel and cobalt from wastewater of galvanic production by electronanofiltration], *Zhurnal prikladnoy khimii* [Journal of Applied Chemistry]. 2021, vol. 94, issue 8, pp. 1059-1064 (In Russ., abstract in Eng.)

8. Khorokhorina I.V. *PhD of Doctor's thesis (Eng.)*, Tambov, 2021. 407 p. (In Russ.)

9. Povarova L.V. [Analysis of oil-containing wastewater treatment methods], *Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (politehnicheskij vestnik)* [The science. Technic. Technologies (Polytechnic Bulletin)], 2018, no. 1, pp. 189-205. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Sautkina T.N., Chesnokova E.V., Rogatkin A.Yu. [Review of reagentless methods of water purification], *Tekhnicheskoye regulirovaniye v transportnom stroitel'stve* [Technical regulation in transport construction], 2019, no. 4(37), pp. 239-242 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Dmitrovskaya T.A., Gromova V.S., Tkachenko O.A. *Ekologo-ekonomicheskiye raschety: ucheb. posobiye* [Ecological and economic calculations: a textbook], Orel, OrelGTU, 2004. 47 p. (In Russ.)

Technological Design and Economic Evaluation of Electromembrane Methods of Industrial Wastewater Treatment from Heavy Metals and Surfactants

I. V. Khrokhорina, S. I. Lazarev, O. S. Filimonova, K. V. Bryankin

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Keywords: membrane methods; cleaning; heavy metals; surfactants.

Abstract: The application of baromembrane and electrobaromembrane methods in technological processes of industrial wastewater treatment from metal ions and anionic surfactants is considered. An effective combination of baromembrane methods with electro-nanofiltration purification method is shown. The methodology is proposed and the calculation of the economic efficiency of the developed engineering schemes for wastewater treatment using electromembrane methods is performed.

© И. В. Хорохорина, С. И. Лазарев,
О. С. Филимонова, К. В. Брянкин, 2023