

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННЫХ МЕТОДОВ В ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**Д. Н. Коновалов, И. В. Хорохорина,
О. С. Филимонова, С. И. Лазарев**

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

Ключевые слова: гальваническое производство; очистка сточных вод; электромембранные методы; эколого-экономическая оценка.

Аннотация: Предложена модернизированная технологическая схема комплексных очистных сооружений на этапе обезвреживания сточных промывных вод гальванических линий с применением электронанофильтрации и нанофильтрации, а также обезвреживания концентрированных стоков. Рассмотрен этап обезвреживания сточных промывных вод. Проведена эколого-экономическая оценка внедрения электробаромембранных технологий в систему очистки сточных вод гальванических предприятий на примере АО «Тамбовмаш» традиционными реагентными методами и при внедрении мембранного оборудования. Рассчитан срок окупаемости проекта.

Введение

Интенсивное развитие промышленного производства оказывает все более возрастающую нагрузку на окружающую среду и здоровье человека. Гальваническое производство является одним из наиболее опасных источников загрязнения из-за большого количества образующихся сточных вод, содержащих высокие концентрации тяжелых металлов (меди, железа, никеля, кадмия, хрома, алюминия, свинца, цинка и др.), которые не поддаются биологическому разложению. В биотопах каждый тяжелый металл играет свою роль, проявляя токсическое действие, и аккумулируется в пищевых цепях, вызывая неизбежный ущерб [1].

Коновалов Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии автомобильного транспорта»; Хорохорина Ирина Владимировна – доктор технических наук, доцент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; Филимонова Ольга Сергеевна – старший преподаватель кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; аспирант кафедры «Механика и инженерная графика», e-mail: nauka2613@mail.ru; Лазарев Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика», ТамбГТУ, Тамбов, Россия.

Поэтому в условиях стремительной глобальной индустриализации постоянно предпринимаются меры по совершенствованию цикла использования воды и защите водных ресурсов. Федеральный закон от 07.12.2011 № 416-ФЗ (ред. от 13.06.2023) «О водоснабжении и водоотведении» устанавливает требования к составу и свойствам сточных вод, сбрасываемых в водные объекты организациями, осуществляющими водоотведение, которые определяются в соответствии с законодательством в области охраны окружающей среды и обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения, а также комплекса правовых норм, определяющих правовой режим водных ресурсов страны, порядок их использования и охраны [2].

Совершенствование методов очистки сточных вод промышленных предприятий необходимо не только для снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду, но и для сокращения потребления чистой воды из природных источников. В некоторых случаях традиционные методы очистки неэффективны из-за стойкой природы присутствующих загрязняющих веществ. Поэтому современной альтернативой внедрения малоотходных технологий на промышленных предприятиях являются электрохимическая обработка и мембранные методы очистки [3, 4].

Цель исследования – эколого-экономическая оценка внедрения электробаромембранных технологий в систему очистки сточных вод гальванических предприятий.

Проведен сравнительный расчет очистки сточных вод гальванического цеха АО «Тамбовмаш» традиционными реагентными методами и при внедрении мембранного оборудования. Завод «Тамбовмаш», не имея собственных технологических линий для очистки сточных вод, содержащих гальванические и органические примеси, отправляет свои стоки для нейтрализации на АО «Пигмент», за что осуществляет оплату в размере 561 р. за тонну сточных вод.

Разработанное мембранное оборудование позволило бы не только утилизировать собственные жидкие отходы, но и использовать очищенную воду для хозяйственных нужд, тем самым осуществляя замкнутый цикл водоснабжения.

Этап обезвреживания сточных промывных вод

На рисунке 1 представлен модернизированный фрагмент технологической схемы комплексных очистных сооружений с установкой приготовления деминерализованной воды КОС-65 [5] на этапе обезвреживания сточных промывных вод гальванических линий с применением электронанофильтрации и нанофильтрации, а также обезвреживания концентрированных стоков.

В процессе обезвреживания промывных сточных вод происходит окисление, восстановление и нейтрализация стоков. После этого промывная вода поступает в накопительную емкость 1 на электробаромембранное и баромембранное разделение.

При достижении среднего уровня в емкости 6, которая соединяется с емкостью 2, как сообщающиеся сосуды, при включенной кнопке на панели управления включается установка электронанофильтрации 3, на которой

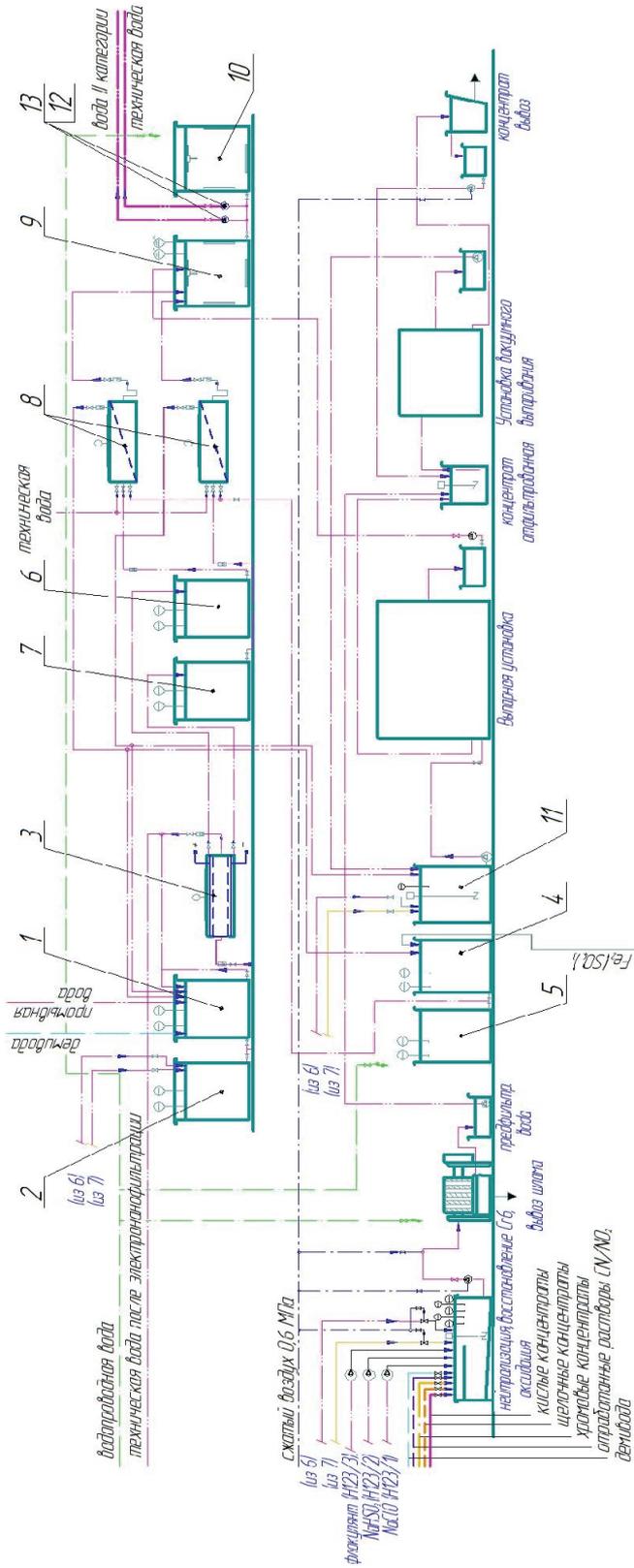


Рис. 1. Модернизированный фрагмент технологической схемы комплексных очистных сооружений с установкой приготовления деминерализованной воды КОС-65 на этапе обезвреживания сточных промывных вод гальванических линий с применением электронанофильтрации и нанофильтрации

проходит электробаромембранное разделение. Установка электронанофильтрации 3 имеет один контур обработки, который снабжен своим повысительным насосом. Ретентат поступает в емкость 1, а также в накопительную емкость для технической воды после электронанофильтрации (на рис. 1 не показана), откуда повторно используется в производственном цикле. Прианодный и прикатодный пермеат накапливается соответственно в емкостях 6 и 7. При отсутствии нижнего уровня в емкости 2 или наличии верхнего уровня в емкостях 1 и 4, а также 6 и 7, установка электронанофильтрации 3 отключается.

При достижении среднего уровня в емкостях 6 и 7 и при включенной кнопке на панели управления включается установка нанофильтрации 8, в которую входят два независимых контура обработки и один общий контур промывки. Каждый контур обработки снабжен своим повысительным насосом. Два контура обрабатывают прианодный и прикатодный пермеат установки электронанофильтрации 3 из емкостей 6 и 7 соответственно и ретентат после нанофильтрации из емкостей 4 и 5.

Пермеат двух контуров установки нанофильтрации 8 поступает в накопительные емкости 9 и 10, которые соединены между собой как сообщающиеся сосуды, а ретентат в емкости 1, 4 и 11. Таким образом, создается рецикл. Работа насосов блокируется при наличии верхнего уровня в емкостях 9 и 10, а также отсутствии нижнего уровня в емкостях 6 и 7.

Ретентат обоих контуров установки нанофильтрации 8 разделяется на два потока. Первый поток поступает в емкость 1, а второй возвращается в емкости 4 и 11 на рецикл. Работа насосов также блокируется при наличии верхнего уровня в емкостях 9 и 10, а также отсутствии нижнего уровня в емкостях 6 и 7.

При наличии нижнего уровня в емкости 9 и включенной кнопке на панели управления, автоматически включается насос 12, который пополняет емкость накопления воды II категории (на рис. 1 не показана) до верхнего уровня обессоленным пермеатом из емкостей 9 и 10. При наличии верхнего уровня в емкости накопления воды II категории или при отсутствии нижнего уровня в емкости 8 насос 12 отключается.

При наличии нижнего уровня в емкости 9 и включенной кнопке насоса 13 на панели управления, он автоматически включается, пополняя емкость накопления технической воды (на рис. 1 не показана) до верхнего уровня обессоленным пермеатом из емкостей 9 и 10 на последующую деминерализацию. При наличии верхнего уровня в емкости накопления технической воды или при отсутствии нижнего уровня в емкости 9 насос 13 отключается. Далее обработка проводится на этапе приготовления деминерализованной воды.

Сконцентрированный раствор методами электробаромембранного и баромембранного разделения накапливается в емкости 11, снабженной мешалкой и рН-метром, в которую при необходимости осуществляется подача прианодного (кислого) или прикатодного (щелочного) пермеата из емкостей 6 и 7 соответственно для поддержания необходимого $\text{pH} = 6,5 \dots 8,5$. Также величина рН контролируется в емкостях 1 и 2, при необ-

ходимости осуществляется подача прианодного (кислого) или прикатодного (щелочного) пермеата из емкостей 6 и 7 соответственно для поддержания необходимого рабочего диапазона pH = 2...12 для нанофильтрационных мембран.

Эколого-экономический расчет

Для проведения оценки экономической эффективности разработанной инженерной схемы очистки сточных вод АО «Тамбовмаш» проведены следующие расчеты (на основе данных по заводу и полученных результатов по сорбционным параметрам мембранных процессов в производстве разделения промышленных растворов).

Стоимость утилизации сточных вод по данным завода составляет 561 р./т. Объем технологических растворов предприятия 18 780 м³/год или 1 565 т/месяц = 1 878 т/месяц (оборудование нужно 85 т/сут., берем с запасом) с учетом коэффициента перевода для шламов (1,2).

Рабочий режим предприятия: 5 дней в неделю по 8 часов, 1 смена, 22 рабочих дня в месяц.

Цена очистных сооружений, модернизированных мембранными модулями, производительностью 100 м³/сут. (4 м³/ч – 450 000) [6], а также монтажных и пуско-наладочных работ, включая подготовку обслуживающего оборудование персонала в ценах на 2023 г. составит примерно 6,9 млн р.

Расчет затрат на очистку сточных вод АО «Тамбовмаш» при электробаромембранной технологии (в ценах 2023 г.):

1. Среднемесячные затраты на реагенты с учетом объема отработанных технологических растворов предприятия и стоимости реагентов, используемых на 1 т, составят

$$Z_p = 1\,565 \text{ т} \cdot 64 \text{ р.} = 100\,160 \text{ р.}$$

2. Расходы на оплату электроэнергии в одну смену и за месяц работы предприятия (стоимость 1 кВт по Тамбовской области для предприятий – 8,3 р.) соответственно:

$$P_{эл} = (4 \cdot 40 \text{ кВт/ч} \cdot 8 \text{ ч} + 2 \cdot 65 \text{ кВт/ч} \cdot 8 \text{ ч}) \cdot 8,3 \text{ р.} = \\ = (1\,280 + 1\,040) \cdot 8,3 \text{ р.} = 19\,256 \text{ р.}$$

$$P_{эл.м} = 19\,256 \cdot 22 = 423\,632 \text{ р.}$$

3. Рассчитаем затраты на заработную плату в месяц персонала предприятия, премиальные выплаты, различные страховые производственные выплаты. Для обслуживания электробаромембранных модулей необходим следующий персонал (но так как на предприятии есть такой штат сотрудников, учтем только доплаты к заработной плате за дополнительную нагрузку):

- аппаратчик (з/п 15 000 р./мес.);
- технолог (оклад 17 000 р./мес.);
- слесарь (оклад 15 000 р./мес.);
- лаборант (17 000 р./мес.).

Суммарные затраты по данной статье расходов составят

$$Z_{\text{сум}} = (15\,000 \cdot 1 + 17\,000 \cdot 1 + 15\,000 \cdot 1 + 17\,000 \cdot 1) \cdot 1,34^1 = 85\,760 \text{ р.}$$

4. Годовое обслуживание одной промышленной наночисточной установки по данным изготовителя-поставщика (включая химпромывку) – от 20 000 р, число модулей в технологической схеме – 3:

$$O_M = 60\,000 \text{ р./12 мес.} = 5\,000 \text{ р.}$$

5. Рассчитаем амортизационные расходы в месяц при сроке окупаемости в 10 лет, где 6 900 000 р. – первоначальная стоимость объекта на начало года:

$$AP = 6\,900\,000 / 10 \text{ лет} / 12 \text{ мес.} = 57\,500 \text{ р.}$$

6. Рассчитаем себестоимость очистки всего объема отработанных технологических растворов в месяц

$$C = 100\,160 + 423\,632 + 85\,760 + 5\,000 + 57\,500 = 672\,052 \text{ р./мес,}$$

соответственно на 1 т она составит 430 р.

Сводные данные расчета затрат на очистку сточных вод представлены в табл. 1.

При внедрении на предприятие технологической схемы с использованием мембранного оборудования снижение себестоимости очистки 1 т сточных вод составит $561 - 430 = 131$ р. Сравнительная оценка традиционной и электробаромембранной технологий очистки технологических растворов на АО «Тамбовмаш» приведена в табл. 2.

Разработанное баромембранное и электробаромембранное оборудование предложено на АО «Тамбовмаш» для концентрирования растворов, содержащих катионы металлов. При разделении технологических растворов на электробаромембранном оборудовании образуется два потока: подкисленный и подщелоченный пермеат. Эти жидкости можно использовать в качестве реагентов для нейтрализации сточных вод в усреднительной емкости, тем самым снижая себестоимость очистки 1 т жидких отходов.

Таблица 1

Расчет затрат на очистку сточных вод АО «Тамбовмаш» при использовании электробаромембранной технологии

Издержки	Затраты на очистку 1 т, р.	Затраты на очистку в месяц, р.
Реагенты	64	100 160
Энергоносители	270	423 632
Зарплата персонала	102	160 800
Обслуживание электробаромембранного модуля	4	5 000
Амортизация	21	33 333
Себестоимость	430	672 052

¹ Тарифы страховых взносов в 2023 г.: пенсионное страхование – 22 %; социальное страхование – 2,9 %; медицинское страхование – 5,1 %; страхование от несчастных случаев на производстве – 0,4 % (класс предприятия – 3).

Таблица 2

Сравнительная оценка традиционной и электробаромембранной технологий очистки технологических растворов на АО «Тамбовмаш»

Показатели	Технология очистки	
	существующая	предлагаемая
Объем сточных вод в месяц, т	1 565	1 565
Капитальные затраты	0	6 900 000
Эксплуатационные затраты на 1 т сточных вод, р.	561	430
Экономический эффект от внедрения новой технологии, р.:		
на 1 т сточных вод	0	131
на месячный объем сточных вод		672 052

Отходы на АО «Тамбовмаш» относятся ко II классу опасности, по которым норматив платы за размещение отходов производства и потребления установлен 2 507 р./т (2023 г.). Сумма за размещение отходов определяется по их классу опасности.

Размещение отходов может проводиться как в пределах установленного лимита, так и сверх него, в связи с чем порядок расчета платы будет отличаться:

- в пределах установленного лимита

$$П = С \cdot М \cdot 2 \cdot 7,42, \quad (1)$$

где С – ставка оплаты за вывоз 1 т (1 м³) отходов; М – масса (объем) отходов к вывозу, т (м³); 2 – почвенный коэффициент; 7,42 – коэффициент инфляции в 2023 г.

В результате деятельности АО «Тамбовмаш» в месяц образуется примерно 1500 т сточных вод II класса опасности в границах лимита.

Рассчитаем плату за сброс сточных вод в канализацию [7]

$$П_{ст} = К \cdot Т \cdot Q, \quad (2)$$

где К – коэффициент компенсации (5, 10 или 25); Т – тариф на водоотведение, р./м³; Q – объем сточных вод, м³.

$$П_{ст} = 5 \cdot 32,94 \cdot 1500 \text{ м}^3 \cdot 12 \text{ мес.} = 2\,964\,600 \text{ р./г.}$$

Данную сумму можно считать экономической выгодой при внедрении технологической схемы, модернизированной мембранным оборудованием.

Доход:

10 535 580 р./г. (за утилизацию на АО «Пигмент») – 8 075 400 р./г.

(при самостоятельной очистке) = 2 460 180 р./г.

Зная, что с помощью мембранного оборудования можно вернуть в оборотный цикл около 50 % использованной воды, рассчитаем дополнительную прибыль (ДП) от внедрения мембранного оборудования

Таблица 3

Результаты экономического расчета базового и проектного вариантов

Технико-экономические показатели	Затраты на очистку 1 т, р.		Затраты на весь объем, р.	Изменение величины
	существующие	предлагаемые		
Себестоимость	561	430	10 535 580	2 460 180
Прибыль от использования оборотного водоснабжения	–			309 306
Плата за размещение отходов (экологический эффект), р./г.	10 535 580	8 075 400	–	2 460 180
Экономический эффект, р.	–			2 769 486
Срок окупаемости, лет	–			2,5

$$\text{ДП} = 18\,780 \text{ т/2} \cdot 32,94 \text{ р.} = 309\,306 \text{ р./г.}$$

Экономический эффект в год

$$\text{Э}_Г = 2\,460\,180 \text{ р.} + 309\,306 \text{ р.} = 2\,769\,486 \text{ р.}$$

Денежный поток будет равен экономическому эффекту.

Рассчитаем срок окупаемости капитальных вложений

$$T_{\text{окуп}} = \frac{TK_{\text{доп}}}{\sum_{i=1}^T \text{ДП} \frac{1}{(1+E)^i}}, \quad (3)$$

где E – норма дисконта, %; T – число шагов расчета.

Тогда

$$T_{\text{окуп}} = 6\,900\,000 / 2\,769\,486 \approx 2,5.$$

Результаты экономического расчета базового и проектного вариантов представлены в табл. 3.

Заключение

Предложена технологическая схема комплексных очистных сооружений с установкой приготовления деминерализованной воды КОС-65. После обезвреживания сточных промывных вод гальванических линий поток поступает на электробаромембранное и баромембранное разделение, что позволяет осуществлять замкнутый цикл водоснабжения на производстве. Дополнительная прибыль от внедрения мембранного оборудования составит 309 306 р./г. Ожидаемый экономический эффект от пред-

ложенной технологической схемы составит 2 769 486 р. в год, экологический – 2 460 180 р. в год. Срок окупаемости составляет 2,5 года, что экономически выгодно.

Работа выполнена в рамках проведения исследований по государственному заданию, проект № FEMU-2024-0011.

Список литературы

1. Asati, A. Effect of Heavy Metals on Plants: An Overview / A. Asati, M. Pichhode, K. Nikhil // *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM)*. – 2016. – Vol. 5, No. 3. – P. 56 – 66. doi: 10.13140/RG.2.2.27583.87204

2. О водоснабжении и водоотведении : Федер. закон № 416-ФЗ (ред. от 13.06.2023) от 23 нояб. 2011 г. – Текст : электрон. – URL : https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_122867/?ysclid=lyigmytbwr424820999 (дата обращения: 12.07.2024).

3. Хорохорина, И. В. Расчет эколого-экономической эффективности применения электробаромембранного метода разделения технологических растворов металлообрабатывающих производств / И. В. Хорохорина, С. И. Лазарев, М. И. Михайлин // *Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент : материалы XII Междунар. науч.-инновац. молодежной конф. (Тамбов, 20 – 22 мая 2020 г.)*. – Тамбов, 2020. – С. 138 – 140.

4. Абоносимов, Д. О. Применение мембранных технологий в очистке сточных вод гальванопроизводств / Д. О. Абоносимов, С. И. Лазарев // *Вест. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2014. – Т. 20, № 2. – С. 306 – 313.

5. Комплексные очистные сооружения с установкой приготовления деминерализованной воды КОС-65. Руководство по эксплуатации. – Тамбов : АО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица, 2018. – 35 с.

6. Промышленные установки нанофильтрации «НФС» от 0,25 до 100 м³/ч. – Текст : электрон. – URL : <https://bizorg.su/sistemy-ochistki-vody-r/p2767241-promyshlennye-ustanovki-nanofilytratsii-nfs-ot-0-25-do-100-m3-ch> (дата обращения: 12.07.2024).

7. Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации : постановление Правительства РФ от 29.07.2013 №644 (ред. от 28.11.2023). – Текст : электрон. – URL : https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_150474/2e39e0940ecff2c71eb8065e12f3427841ed3548/ (дата обращения: 12.07.2024).

References

1. Asati A., Pichhode M., Nikhil K. Effect of Heavy Metals on Plants: An Overview, *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM)*, 2016, vol. 5, no. 3, pp. 56-66. doi: 10.13140/RG.2.2.27583.87204

2. available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_122867/?ysclid=lyigmytbwr424820999 (accessed 12 July 2024).

3. Khorokhorina I.V., Lazarev S.I., Mikhaylin M.I. *Sovremennyye tverdogfaznyye tekhnologii: teoriya, praktika i innovatsionnyy menedzhment: materialy XII Mezhdunar. nauch.-innovats. molodezhnoy konf.* [Modern solid-phase technologies: theory, practice and innovative management: Materials of the XII International Scientific and Innovative Youth Conference] (Tambov, 20-22 May 2020), Tambov, 2020, pp. 138-140. (In Russ.)

4. Abonosimov D.O., Lazarev S.I. [Application of membrane technologies in wastewater treatment of galvanic production], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 306-313. (In Russ., abstract in Eng.)

5. [Complex sewage treatment plants with the installation of demineralized water preparation KOS-65. User manual], Tambov: S.I. Livshits TAGAT JSC, 2018. 35 p. (In Russ.)

6. available at: <https://bizorg.su/sistemy-ochistki-vody-r/p2767241-promyshlennye-ustanovki-nanofilytratsii-nfs-ot-0-25-do-100-m3-ch> (accessed 12 July 2024).

7. available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_150474/2e39e0940ecff2c71eb8065e12f3427841ed3548/ (accessed 12 July 2024).

Ecological and Economic Assessment of the Use of Electrobaromembrane Methods in the Technology of Wastewater Treatment of Electroplating Enterprises

D. N. Konovalov, I. V. Khrokhорina, O. S. Filimonova, S. I. Lazarev

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Keywords: galvanic production; wastewater treatment; electro-membrane methods; environmental and economic assessment.

Abstract: The paper proposes an improved technology of complex wastewater treatment plants at the stage of neutralization of wastewater from galvanic lines using electronanofiltration and nanofiltration, as well as neutralization of concentrated wastewater. The stage of wastewater treatment of washing waters is considered. An environmental and economic assessment of the introduction of electric pressure membrane technologies into the wastewater treatment system of galvanic enterprises was carried out at JSC Tambovmash using traditional reagent methods and with the introduction of membrane equipment. The payback period of the project has been calculated.

© Д. Н. Коновалов, И. В. Хорохорина,
О. С. Филимонова, С. И. Лазарев, 2024