



## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.6

doi: 10.17308/sorpchrom.2024.24/12515

### Переработка кислотных сточных вод производства ванадия

**Александр Николаевич Коржов**, **Сергей Алексеевич Лоза**<sup>✉</sup>,  
**Назар Александрович Романюк**, **Михаил Владимирович Шарафан**

Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия, s\_loza@mail.ru<sup>✉</sup>

**Аннотация.** Ванадий и его соединения, например пентаоксид, токсичны и ядовиты для окружающей среды и человека. Ванадий является одним из важнейших элементов в современном мировом промышленном применении: до 90 % используется как легирующий элемент в металлургии, также он применяется в нефтедобыче, химических источниках тока, автомобильной, аэрокосмической, оборонной и других отраслях промышленности. Рост потребления ресурсов приводит к увеличению объема промышленных кислотных стоков. В процессе производства одной тонны ванадия образуется более 100 м<sup>3</sup> кислых ванадийсодержащих сточных вод с содержанием серной кислоты 20 кг/м<sup>3</sup>, ванадия 0.6 кг/м<sup>3</sup>. Ионообменные мембраны широко используют в современных технологиях водоочистки, процессах утилизации сточных вод. Электродиализ с биполярными ионообменными мембранами применяется в процессах рекуперации кислот и оснований из солевых стоков. В настоящей работе исследованы три схемы электродиализной переработки кислотных ванадийсодержащих сточных вод на лабораторных ячейках. Все исследования проводили на реальной сточной воде российского металлургического предприятия по производству ванадия. Показано, что при прямой электродиализной переработке без предварительной подготовки происходит значительное осадкообразование на мембранах. Наиболее эффективным является процесс предварительного осаждения многовалентных металлов из сточных вод щелочью с последующим применением электродиализа с биполярными мембранами. Данная схема была исследована на лабораторной установке с электродиализной ячейкой с 5 тройными камерами и рабочей площадью каждой ионообменной мембраны 5x20 см<sup>2</sup>. Эксперимент проводили при плотности тока 1-3 А/дм<sup>2</sup>. Показано что применение этого процесса позволяет выделить тяжелые металлы в виде гидроксидов при их осаждении щелочью, вернуть в технологический цикл серную кислоту с концентрацией 2.5-3.5 %, получить щелочь для осаждения металлов и вернуть очищенную воду в техпроцесс. Таким образом, разработана схема безреагентной технологии переработки сточных вод производства ванадия с возвратом очищенной воды, серной кислоты, ванадия, других ценных компонентов, позволяющая значительно уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду.

**Ключевые слова:** ванадий, ионообменная мембрана, биполярный электродиализ, сточные воды, рекуперация серной кислоты.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счёт средств министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект FZEN-2023-0006.

**Для цитирования:** Коржов А.Н., Лоза С.А., Романюк Н.А., Шарафан М.В. Переработка кислотных сточных вод производства ванадия // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2024. Т. 24, № 5. С. 765-774. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12515>

Original article

### Treatment of acidic wastewater from vanadium production

**Alexander N. Korzhov**, **Sergey A. Loza**<sup>✉</sup>, **Nazar A. Romanyuk**, **Mikhail V. Sharafan**

Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation, s\_loza@mail.ru<sup>✉</sup>

**Abstract.** Vanadium and its compounds, such as pentoxide, are toxic and poisonous to the environment and humans. Vanadium is one of the most important elements in modern global industrial applications: up to 90 % is used as an alloying element in metallurgy, and it is also used in oil production, chemical power supplies,



automotive, aerospace, defense and other industries. Increased resource consumption leads to an increase in the volume of industrial acid waste. In the process of producing one ton of vanadium, more than 100 m<sup>3</sup> of acidic vanadium-containing wastewater is generated with a sulfuric acid content of 20 kg/m<sup>3</sup> and vanadium 0.6 kg/m<sup>3</sup>. Ion exchange membranes are widely used in modern water treatment technologies and wastewater recycling processes. Electrodialysis with bipolar ion exchange membranes is used in processes for the recovery of acids and bases from salt wastewater. In this work, three schemes for electrodialysis processing of acidic vanadium-containing wastewater using laboratory cells were investigated. All studies were carried out on real wastewater from a Russian metallurgical enterprise for the production of vanadium. It has been shown that during direct electrodialysis processing without preliminary pretreatment, significant sedimentation occurs on the membranes. The most effective process is the preliminary precipitation of multivalent metals from wastewater with alkali, followed by the use of electrodialysis with bipolar membranes. This scheme was studied on a laboratory setup with an electrodialysis cell with 5 triple chambers and a working area of each ion exchange membrane of 5x20 cm<sup>2</sup>. The experiment was carried out at a current density of 1-3 A/dm<sup>2</sup>. It has been shown that the use of this process makes it possible to isolate heavy metals in the form of hydroxides during their precipitation with alkali, return sulfuric acid with a concentration of 2.5-3.5% to the technological cycle, obtain an alkali for the precipitation of metals and return purified water to the technological process. Thus, a scheme of a reagent-free technology for processing wastewater from vanadium production has been developed with the return of purified water, sulfuric acid, vanadium, and other valuable components, which can significantly reduce the environmental load.

**Keywords:** vanadium, ion exchange membrane, bipolar electrodialysis, wastewater, sulfuric acid recovery.

**Acknowledgments:** This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project number FZEN-2023-0006.

**For citation:** Korzhov. A.N., Loza S.A., Romanyuk N.A., Sharafan M.V. Treatment of acidic wastewater from vanadium production. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2024. 24(5): 765-774. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12515>

## Введение

Разработка и создание бессточных технологий водоподготовки и утилизации сточных вод в настоящее время одна из наиболее актуальных задач в металлургической промышленности. Более 90% добываемого во всем мире ванадия используется в черной металлургии в качестве легирующей добавки. Производство ванадия на мировом рынке составило 110.53 тыс. тонн в 2022 году и по прогнозам достигнет 135.16 тыс. тонн к 2028 г. [1].

В процессе работы металлургических предприятий образуются большие объёмы высокоминерализованных токсичных сточных вод. Например, при производстве товарного ванадия только на одном предприятии образуется около 100-120 м<sup>3</sup>/ч сточных вод, с высокой концентрацией ионов тяжёлых металлов, кислот, щелочей и других примесей [2,3]. Сбросы таких сточных вод могут нанести существенный вред экосистеме и жизнедеятельности человека [4]. Сброс сточных вод, содержащих ванадий, может представлять угрозу для здоровья человека и влиять на окружающую среду [5].

Наиболее токсичны соединения пятивалентного ванадия, его пентаоксид (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) при попадании внутрь организма и при вдыхании поражает дыхательную систему. Так же в промышленных сточных водах ванадиевого производства содержится серная кислота, которая так же опасна для живых организмов.

При производстве ванадия и его сплавов гидрометаллургическим способом образуется сточная вода, состав которой представлен в таблице 1. В настоящее время для утилизации таких отходов используется реагентная технология нейтрализации с использованием 10 % известкового молока с доведением значения pH до 8.0-8.5. Полученная суспензия отстаивается в перколяторах (прямоугольные бассейны) и далее поступает в шламонакопитель для дальнейшего осветления. Качество осветленной воды из-за высокого содержания Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> не соответствует требованиям, предъявляемым к технической воде (таблица 1), используемой на стадиях приготовления сульфата магния и промывки пасты пентаоксида ванадия. По этой причине организация возврата этой воды в

Таблица 1. Состав исходной сточной и технической воды, которую можно вернуть в технологический процесс

Table 1. Composition of initial wastewater and recycled water that can be returned to the process

	рН	Сухой остаток, г/дм <sup>3</sup>	Содержание*, г/дм <sup>3</sup>							
			V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mn	Al	Si	Fe	Ca	Mg	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Сточная вода	1.05-1.54	39.46	0.63	5.04	1.3·10 <sup>-3</sup>	0.23	3·10 <sup>-3</sup>	0.410	1.58	21.4
Техническая	6.5-8.5	≤1.7	–	<0.08	<0.01	<6·10 <sup>-3</sup>	<5·10 <sup>-4</sup>	<0.25	<0.1	<1.0

\*Содержание рассчитано на основании анализа сухого остатка на энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре Shimadzu EDX 800HS2

\*Content calculated based on analysis of dry residue on a Shimadzu EDX 800HS2 energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer

производство является невозможной. Также, следует отметить, что со сливной водой безвозвратно теряется в час около 70 кг ванадия (в пересчете на пентаоксид), что составляет более 600 тонн в год.

Улучшение, оптимизация действующих и разработка новых энерго-ресурсосберегающих технологий переработки промышленных сточных вод являются приоритетными направлениями. Традиционно применяются разнообразные методы и технологии: реагентные [6], сорбционные [7-9], физико-химические [10], ионообменные методы [11,12], флотация [13], гибридные способы и другие [14-17]. К современным методам очистки относятся нанопрофильтрация, обратный осмос, биохимические методы и электрохимические (электрофлотация, электрокоагуляция, электродиализ). Наиболее перспективным методом переработки сточных вод является электродиализ, в котором ионы растворенных веществ переносятся через мембрану под действием электрического поля [18-20].

Целью настоящей работы являлась оценка возможности применения различных электродиализных схем для переработки кислотных сточных вод промышленного производства ванадия.

### Экспериментальная часть

Материалы и методы. Объектом исследования является реальная сточная вода, образующаяся в технологическом процессе производства пентаоксида ванадия, состав которой указан в таблице 1.

Для исследования переработки ванадийсодержащих сточных вод с применением метода электродиализа разработали три различные схемы. В схеме I использован электродиализатор с монополярными мембранами, в схеме II – электродиализатор с биполярными мембранами с двухкамерной элементарной ячейкой, в схеме III – электродиализатор с биполярными мембранами с трехкамерной элементарной ячейкой. Согласно каждой схеме собраны и исследованы лабораторные электродиализаторы с гетерогенными монополярными ионообменными мембранами МК-40, МА-41 и биполярными ионообменными мембранами МБ-3 производства ООО «ИП Щекиноазот», Россия.

Лабораторные электродиализаторы состояли из 5 парных либо тройных камер и имели рабочий размер мембран 5х20 см<sup>2</sup>, такие размеры лабораторных ячеек позволяют масштабировать результаты исследования процессов электродиализной переработки растворов для моделирования характеристик промышленных электродиализаторов. Межмембранное расстояние в камерах концентрирования и обессоливания составляло 0.9 мм. Линейные скорости потока раствора составляли 1.9 см/с. Такое значение скорости характерно для промышленных электродиализаторов. Скорость потока жидкости через электродные камеры была постоянной (20 дм<sup>3</sup>/ч). Эксперимент проводили при плотности тока 1-3 А/дм<sup>2</sup>.

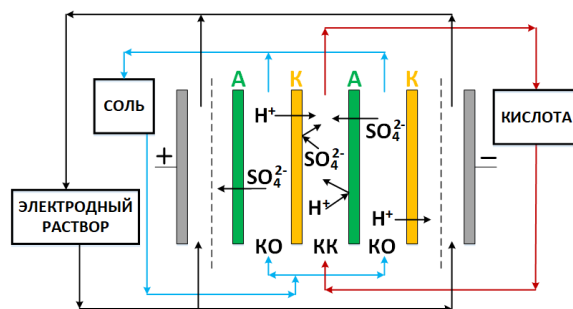


Рис. 1. Схема переработки раствора электродиализатором с чередующимися катионо- и анионообменными мембранами: А – анионообменная мембрана; К – катионообменная мембрана; КО – камера обессоливания; КК – камера концентрирования

Fig 1. Scheme of solution processing by an electrodialyzer with alternating cation and anion exchange membranes: A – anion exchange membrane; K – cation exchange membrane; KO – desalting chamber; KK – concentration chamber

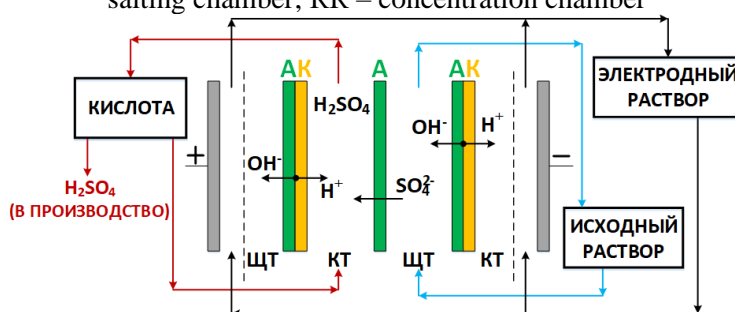


Рис. 2. Схема переработки раствора электродиализатором с биполярными и анионообменными мембранами: АК – биполярная мембрана; А – анионообменная мембрана; КТ – раствор извлеченной серной кислоты; ЩТ – исходный раствор

Fig. 2. Scheme of solution processing by an electrodialyzer with bipolar and anion-exchange membranes: АК – bipolar membrane; А – anion exchange membrane; КТ – solution of extracted sulfuric acid; ЩТ – initial solution

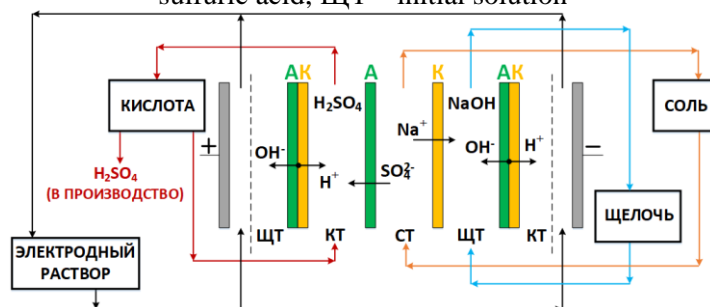


Рис. 3. Схема переработки раствора с применением электродиализатора-синтезатора с биполярными и монополярными катионо- и анионообменными мембранами: АК – биполярная мембрана; А – анионообменная мембрана; К – катионообменная мембрана, КТ – раствор извлеченной серной кислоты; ЩТ – щелочной раствор, СТ – перерабатываемый раствор

Fig. 3. Scheme of solution processing using an electrodialyzer-synthesizer with bipolar and monopolar cation- and anion-exchange membranes: АК – bipolar membrane; А – anion exchange membrane; К – cation exchange membrane, КТ – solution of extracted sulfuric acid; ЩТ – alkaline solution, СТ – processed solution

При меньших плотностях тока электродиализатор имеет низкую производительность, а при больших наблюдается сильный омический разогрев раствора, что

может привести к повреждению электродиализатора. В качестве электродного раствора был использован сульфат натрия с концентрацией 0.5 моль-экв/дм<sup>3</sup>.

**Схема I.** Был использован электродиализатор с чередующимися мембранами МК-40 и МА-41, который традиционно используется для обессоливания и концентрирования исходных растворов. Испытания проводились в циркуляционном режиме по схеме, изображенной на рисунке 1.

Перерабатываемый раствор подается в камеры обессоливания электродиализатора, где он подвергается деионизации, а серная кислота и другие ионные примеси концентрируются в камерах концентрирования. В ходе эксперимента определяли содержание серной кислоты и общее содержание сульфатов в циркулирующих растворах.

**Схема II.** Использовали электродиализатор с анионообменными МА-41 и биполярными мембранами МБ-3 с двухкамерной элементарной ячейкой для извлечения серной кислоты из сульфатных ванадийсодержащих растворов. Схема процессов, протекающих в электродиализаторе представлена на рисунке 2.

В камеру, образованную анионитовой стороной биполярной мембраны и анионитовой мембраной подается перерабатываемый раствор. Под действием электрического поля происходит перенос сульфат ионов в соседнюю камеру, а на их место из биполярной мембраны приходит эквивалентное количество гидроксил ионов. Таким образом, происходит нейтрализация серной кислоты с одновременным обессоливанием раствора. В камере, куда переносится сульфат ион происходит генерация  $H^+$  ионов на биполярной границе мембраны и таким образом происходит концентрирование серной кислоты.

**Схема III.** В данной схеме был использован электродиализатор-синтезатор с трехкамерной элементарной ячейкой, содержащий мембраны МБ-3, МА-41 и МК-40, который обычно используется для рекуперации растворов солей в кислоту и щелочь. Электродиализатор имел три

тракта – солевой, кислотный и щелочной (рис. 3).

Выходы по току кислоты и щелочи  $\eta$  в электродиализном аппарате рассчитывали по формуле (1)

$$\eta = \frac{F}{IN_{\text{яч}}} \left( \frac{n}{\tau} \right) \quad (1)$$

где  $I$  – ток, подаваемый на аппарат;  $N_{\text{яч}}$  – число элементарных ячеек в мембранном пакете электродиализного аппарата;  $n$  – число молей полученной кислоты или щелочи;  $\tau$  – время, прошедшее с начала эксперимента;  $F$  – постоянная Фарадея.

Удельные энергозатраты, необходимые для получения кислоты и щелочи,  $W$  рассчитывали по формуле (2):

$$w = \frac{UF}{3600M\eta N_{\text{яч}}} \quad (2)$$

где  $U$  – напряжение, подаваемое на электродиализный аппарат;  $M$  – молярная масса серной кислоты или гидроксида натрия.

Прямая переработка растворов, содержащих многозарядные катионы металлов может привести к осадкообразованию с последующим выходом из строя электродиализатора. Для предотвращения этого исходный раствор предварительно нейтрализуется натриевой щелочью в реакторе-осадителе. При достижении рН осадкообразования соединений металлов образуется осадок, состав которого зависит от значения рН. При добавлении щелочи сначала осаждаются соединения ванадия, далее преимущественно выпадает гидрат окиси марганца. Для полного осаждения магния необходимо достичь рН раствора более 12.4. После осветления и фильтрации раствор представляет собой раствор сульфата натрия, который электрохимически рекуперирован в натриевую щелочь и серную кислоту в электродиализаторе с биполярными мембранами. Натриевая щелочь, получаемая непосредственно в электродиализаторе-синтезаторе с биполярными мембранами, используется для нейтрализации раствора в реакторе-осадителе. Таким образом, серная кислота может быть возвращена в технологический процесс, а

Таблица 2. Состав растворов до и после электродиализной переработки по Схеме I  
Table 2. Composition of solutions before and after electro dialysis processing according to Scheme I

	pH	Электропроводность, мСм/см	Сухой остаток, г/л	Концентрация H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , моль/дм <sup>3</sup>	Концентрация SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> моль/дм <sup>3</sup>
Исходный раствор	1.19	31.0	36.79	0.13	0.204
Обессоленный раствор	2.27	2.30	1.36	1.1·10 <sup>-3</sup>	0.018
Концентрат	0.70	65.8	98.60	0.40	0.526

натриевая щелочь возвращается в рецикл для осаждения соединений многовалентных металлов.

Концентрацию серной кислоты определяли прямым потенциометрическим титрованием с использованием автотитратора Mettler Toledo EasyPlus Titraion, погрешность определения не превышала 3%. Концентрацию сульфат-ионов, а также ионов натрия, кальция, магния определяли методом ионной хроматографии с помощью ионного хроматографа Аквилон Стайер.

### Обсуждение результатов

**Схема I.** При прямой электродиализной переработке удается выделить более 90% серной кислоты из исходного раствора (таблица 2). Совместно с серной кислотой в камеру концентрирования переносятся ионы металлов. При проведении электродиализной переработки сточной воды в растворе камеры концентрирования выпал белый осадок, анализ которого показал наличие кальция и серы, что соответствует составу гипса.

Проблема осадкообразования в камере концентрирования, а также невозможность разделения серной кислоты и соединений металлов показывают, что данная схема не подходит для переработки исследуемых сточных вод.

**Схема II.** При переработке сточной воды по данной схеме после проведения электродиализа был обнаружен обильный осадок бурого цвета на анионитовой стороне биполярных мембран. Это связано с локальным повышением pH за счет

потока генерируемых гидроксил ионов, что может приводить к осаждению соединений тяжелых металлов. Цвет осадка, по-видимому, обусловлен присутствием диоксида марганца.

Таким образом Схема II непригодна для переработки растворов данного состава, так как обильное осадкообразование приведет к быстрому выходу из строя электродиализатора.

**Схема III.** Было произведено осаждение соединений многовалентных металлов гидроксидом натрия до достижения pH=12.5. В осветленном и отфильтрованном растворе при анализе на хроматографе ионном «Стайер» производства «Аквилон» наблюдался только пик натрия, остальные катионы отсутствовали. Полученный раствор сульфата натрия был переработан в электродиализаторе в серную кислоту и гидроксид натрия. Кинетические зависимости концентраций продуктов при различных плотностях тока приведены на рисунке 4. При работе электродиализатора-синтезатора на осветленном растворе сульфата натрия после осаждения гидроксидов металлов из сточной воды была получена серная кислота с концентрацией до 0.36 моль/дм<sup>3</sup>.

По полученным данным были рассчитаны выходы по току, приведенные на рисунке 5. Выходы по току уменьшаются по мере обессоливания перерабатываемого раствора в солевой камере. Соответственно увеличиваются энергозатраты на рекуперацию кислоты и щелочи. Удельно

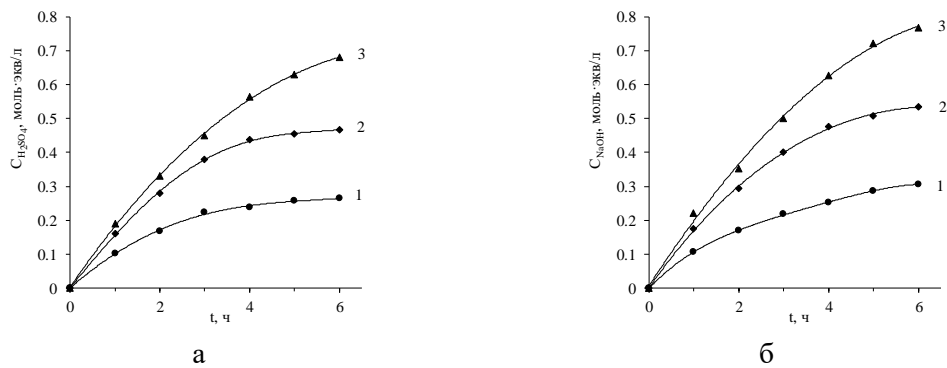


Рис.4. Зависимости концентраций серной кислоты (а) и гидроксида натрия (б) при переработке сульфата натрия с помощью ЭДС с трехкамерными элементарными ячейками (по схеме III): 1 – 1 А/дм<sup>2</sup>, 2 – 2А/дм<sup>2</sup>, 3 – А/дм<sup>2</sup>

Fig.4. Dependences of the concentrations of sulfuric acid (a) and sodium hydroxide (b) during the processing of sodium sulfate using EMF with three-chamber unit cells (according to scheme III): 1 – 1 A/dm<sup>2</sup>, 2 – 2 A/dm<sup>2</sup>, 3 – A/dm<sup>2</sup>

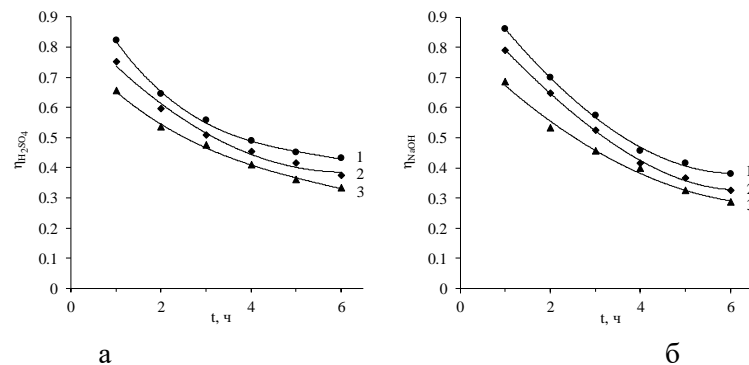


Рис. 5. Зависимости выходов по току при получении кислоты (а) и щелочи (б): 1 – А/дм<sup>2</sup>, 2 – 2А/дм<sup>2</sup>, 3 – А/дм<sup>2</sup>

Fig. 5. Dependences of current efficiency when producing acid (a) and alkali (b): 1 – 1 A/dm<sup>2</sup>, 2 – 2 A/dm<sup>2</sup>, 3 – A/dm<sup>2</sup>

ные энергозатраты на рекуперацию серной кислоты и гидроксида натрия возрастают при увеличении плотности тока (таблица 3). Для серной кислоты получены значения 197-263 Вт·ч/моль, что в пересчете на перерабатываемый раствор составляет 26-34 Вт·ч/дм<sup>3</sup>. Таким образом, применение схемы III с предварительным осаждением соединений поливалентных металлов позволяет переработать исследуемые сточные воды с извлечением необходимых компонентов.

На основании проведенных исследований предложена безреагентная технологическая схема переработки сульфатных ванадийсодержащих сточных вод производства ванадия, рисунок 6. Суть схемы

заключается в предварительной нейтрализации стоков гидроксидом натрия до рН 12.5, разделении полученного раствора на осадок и фильтрат. Полученный фильтрат направляется на вход биполярного электродиализатора, где происходит его переработка при плотности тока 1-3 А/дм<sup>2</sup>. Полученную серную кислоту, возвращают в производственный цикл для процесса выщелачивания, а гидроксид щелочного металла, направляют в технологический процесс для нейтрализации сточных вод. Очищенная вода, образующаяся из раствора сульфата натрия, может быть направлена на доочистку, либо возвращена в производственный процесс для приготовления технологических растворов.

Таблица 3. Зависимости удельных энергозатрат от плотности тока при получении кислоты и щелочи

Table 3. Dependencies of specific energy consumption (W) on current density when producing acid and alkali

Плотность тока, А/м <sup>2</sup>	W <sub>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></sub> , Вт·ч/моль	W <sub>NaOH</sub> , Вт·ч/моль
1	197	101
2	248	128
3	263	140



Рис. 6. Безреагентная электромембранная схема переработки кислотных сточных вод производства ванадия

Fig. 6. Reagent-free electromembrane scheme for processing acid wastewater from vanadium production

### Заключение

Результаты исследований переработки кислых ванадийсодержащих стоков методом электродиализа по различным схемам показали, что использование комбинаций катионо- и анионообменных мембран, а также биполярных и анионообменных (схемы I и II) не позволяет выполнить прямую переработку стоков из-за осадкообразования. Решением данной проблемы может стать предварительное осаждение щелочью соединений многовалентных металлов с последующей переработкой раствора сульфата натрия методом биполярного электродиализа с трехкамерной элементарной ячейкой (схема III). Натриевая щелочь, необходимая для осаждения гидроксидов металлов, генерируется электрохимически из сульфата натрия, образующегося в осветленном растворе после осаждения гидроксидов металлов. Получаемая натриевая щелочь не вводится в технологиче-

ский процесс, а служит только для осаждения гидроксидов. При этом также образуется серная кислота с концентрацией 2.5-3.5%, что соответствует требованиям для возврата в технологический процесс.

Определены массообменные и энергетические характеристики процесса переработки раствора сульфата натрия при плотностях тока 1-3 А/дм<sup>2</sup>.

На основе проведенных исследований предложена технологическая схема для переработки ванадийсодержащих стоков без образования вторичных стоков и шлама, с возвратом в производство серной кислоты и воды, а также концентрата, содержащего ванадий и другие металлы. Данная схема позволит разработать замкнутую безреагентную технологическую схему переработки ванадия и значительно улучшить экономические характеристики и экологичность процесса.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет из-





вестных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые

могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

### Список литературы/References

1. Global Vanadium Market 2023. Available at: <https://au.finance.yahoo.com/news/global-vanadium-market-2023-increasing-121300884.html?guccounter=1> (accessed 8 may 2024).
2. Goonan T.G. Vanadium recycling in the United States in 2004, *U.S. geological survey circular*. 2011; 1196–S: 1-17. <https://doi.org/10.3133/cir1196S>
3. Moskalyk R.R., Alfantazi A.M. Processing of vanadium: A review, *Minerals Engineering*, 2003; 16(9): 793-805. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00213-9](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00213-9)
4. Ota Y., Suzuki A., Yamaoka K., Nagao M., Tanaka Y., Irizuki T., Fujiwara O., Yoshioka K., Kawagata S., Kawano S., Nishimura O. Geochemical distribution of heavy metal elements and potential ecological risk assessment of Matsushima Bay sediments during 2012–2016, *Sci. Total Environ.*, 2021; 751: 141825. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141825>
5. Makhotkina E.S., Shubina M.V., Shubin I.G. Industrial, ecological and resource-efficient aspects of vanadium production and use of technogenic vanadium sources. *Solid State Phenomena*, 2020; 299: 1115-20. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.265.994>
6. Chen Q., Yao Y., Li X., Lu J., Zhou J., Huang Z. Comparison of heavy metal removals from aqueous solutions by chemical precipitation and characteristics of precipitates, *J. Water Process Eng.*, 2018; 26: 289-300. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.11.003>
7. Belozeroва A.A., Pechishcheva N.V., Ordinartsev D.P., Kholmanskikh I.A., Shunyaev K.Yu. Purification of aqueous solutions from As (III) and As (V) with the use of modified montmorillonite, *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2023; 23(5): 858-867. (In Russ.) <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11720>
8. Zhai Y, Wei X, Zeng G, Zhang D, Chu K. Study of adsorbent derived from sewage sludge for the removal of Cd<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup> in aqueous solutions, *Sep. Purif. Technol.*, 2004; 38(2): 191-196. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.11.007>
9. Shilina A.S., Bakhtin V.D., Burukhin S.B., Askhadullin S.R. Sorption of cations of heavy metals and radionuclides from the aqueous media by new synthetic zeolite-like sorbent, *Nuclear Energy and Technology*, 2017; 3(4): 249-54. <https://doi.org/10.1016/j.nucet.2017.10>
10. Kurniawan T.A., Chan G.Y., Lo W.-H., Babel S. Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals, *Chem. Eng. J.*, 2006; 118(1): 83-98. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.01.015>
11. Dąbrowski A., Hubicki Z., Podkościelny P., Robens E. Selective removal of the heavy metal ions from waters and industrial wastewaters by ion-exchange method, *Chemosphere*, 2004; 56(2): 91-106. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.03.006>
12. Li H.-Y., Yang Y., Zhang M., Wei W., Xie B. A novel anion exchange method based on in situ selectively reductive desorption of Cr(VI) for its separation from V(V): Toward the comprehensive use of hazardous wastewater, *J. Hazardous Materials*, 2019; 368: 670-679. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.01.099>
13. Yuan X.Z., Meng Y.T., Zeng G.M., Fang Y.Y., Shi J.G. Evaluation of tea-derived biosurfactant on removing heavy metal ions from dilute wastewater by ion flotation, *Colloid Surf.*, 2008; 317(1-3): 256-261. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.10.024>
14. Xiang J., Huang Q., Lv X., Bai C. Multistage utilization process for the gradient-recovery of V, Fe, and Ti from



vanadium-bearing converter slag, *J. Hazardous Materials*, 2017; 336: 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.04.060>

15. Zhang J., Zhang W., Xue Z. An environment-friendly process featuring calcified roasting and precipitation purification to prepare vanadium pentoxide from the converter vanadium slag, *Metals*, 2019; 9(1): 21. <https://doi.org/10.3390/met9010021>

16. Khalezov B.D., Krashenin A.G., Vatolin N.A., Bornovolokov A.S. Manganese recovery from vanadium converter slags after leaching of vanadium, *Russian metallurgy (Metally)*, 2020; 2020(1): 32-38. <https://doi.org/10.1134/S0036029520010073>

17. Loza S., Loza N., Korzhov A., Romanyuk N., Kovalchuk N., Melnikov S. Hybrid membrane technology for acid recovery from wastewater in coated steelwire production: A pilot scale study, *Membranes*, 2022; 12(12): 1196.

<https://doi.org/10.3390/membranes12121196>

18. Melnikov S.S., Mugtamtov O.A., Zabolotsky V.I. Study of electro dialysis concentration process of inorganic acids and salts for the two-stage conversion of salts into acids utilizing bipolar electro dialysis, *Sep. Purif. Technol.*, 2020; 235: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116198>

19. Zabolotsky V.I., Korzhov A.N., But A.Yu., Melnikov S.S. Reagent-free electromembrane process for decarbonization of natural water, *J. Membranes and Membrane Technologies*, 2019; 1(6): 341-346. <https://doi.org/10.1134/S2517751619060076>

20. Achoh A., Zabolotsky V., Melnikov S. Conversion of water-organic solution of sodium naphthenates into naphthenic acids and alkali by electro dialysis with bipolar membranes, *Separ. Purif. Technol.*, 2019; 212: 929-940. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.013>

### Информация об авторах / Information about the authors

**Коржов Александр Николаевич** – младший научный сотрудник, Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

**Лоза Сергей Алексеевич** – доцент кафедры физической химии, Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

**Романюк Назар Александрович** – младший научный сотрудник, к.х.н., Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

**Шарафан Михаил Владимирович** – проректор по научной работе и инновациям, д.х.н., Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

**Korzhov Alexander N.** – junior researcher, Department of Physical Chemistry, Kuban State University, Krasnodar, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-8241-1070>, e-mail: [shtrih\\_ooo@mail.ru](mailto:shtrih_ooo@mail.ru)

**Loza Sergey A.** – Associate Professor, Department of Physical Chemistry, Ph.D. (chemistry), Kuban State University, Krasnodar, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-3316-5413>, e-mail: [s\\_loza@mail.ru](mailto:s_loza@mail.ru)

**Romanyuk Nazar A.** – junior researcher, Department of Physical Chemistry, Ph.D. (chemistry), Kuban State University, Krasnodar, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-6682-7735>, e-mail: [romanyuknazar@mail.ru](mailto:romanyuknazar@mail.ru)

**Sharafan Mikhail V.** – Vice-Rector for Research and Innovation, doctor of chemical sciences, Kuban State University, Krasnodar, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-4387-9986>, e-mail: [nts@kubsu.ru](mailto:nts@kubsu.ru)

Статья поступила в редакцию 23.05.2024; одобрена после рецензирования 17.07.2024; принята к публикации 07.08.2024.

The article was submitted 23.05.2024; approved after reviewing 17.07.2024; accepted for publication 07.08.2024.