

Получение сульфата натрия путём изогидрической кристаллизации при обратноосмотической очистке минерализованных сточных вод и обезвреживании растворов

© 2021. И. А. Почиталкина, д. т. н., профессор,
 А. В. Десятов, д. т. н., профессор, Т. А. Павлицева, аспирант,
 И. Б. Сибирякова, студент, И. М. Костанов, студент,
 А. В. Колесников, к. т. н., доцент,
 Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,
 125480, Россия, г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20,
 e-mail: pochitalkina@list.ru

Статья посвящена проблеме обезвреживания промышленных сточных вод, содержащих высокотоксичные хлориды, сульфаты, нитраты, ионы тяжёлых и цветных металлов. Сточные воды, как правило, имеют кислую среду, и первая стадия их обезвреживания заключается в использовании щелочных реагентов (NaOH , Na_2CO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$) для нейтрализации и формирования гибридных осадков железа, алюминия и других металлов. Суммарная концентрация солевых компонентов в технологических растворах составляет от 10 до 100 г/л, чаще всего это смесь Na_2SO_4 , NaCl , NaNO_3 , реже – другие соли. Технология глубокой переработки минерализованных вод заключается в умягчении, фильтрации на напорных фильтрах и микрофильтрации промышленного стока. Особенность предлагаемой схемы заключается в применении обратноосмотического метода обессоливания, в соответствии с которым, происходит концентрирование стока в 3–5 раз и упаривание до солесодержания 200–300 г/л. Такая схема позволяет получить концентрат и пресную воду, соответствующую экологическим требованиям. Концентрат после обессоливания воды поступает на изогидрическую кристаллизацию $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ путём охлаждения до 0 °С. Маточный раствор после центрифугирования пульпы смешивается с исходным потоком и направляется на обратноосмотическую установку, а кристаллогидрат – на сушку для получения безводной технической соли.

На примере модельного технологического раствора, имитирующего жидкие техногенные отходы горнодобывающих предприятий, с помощью расчётно-экспериментальных исследований показана принципиальная возможность получения безводного сульфата натрия путём внутрицикловой изогидрической кристаллизации концентрата после обратноосмотической установки. Предложена принципиальная схема обезвреживания жидких неорганических отходов I и II классов опасности с получением вторичного продукта – Na_2SO_4 , оценена возможность изоморфного захвата примесей при его кристаллизации.

Ключевые слова: сточные воды, обезвреживание, техногенные отходы, кристаллизация, обратноосмотические мембраны.

Preparation of sodium sulfate by isohydric crystallization during reverse osmotic treatment of mineralized wastewater and solution neutralization

© 2021. I. A. Pochitalkina ORCID: 0000-0002-1063-1856*
 A. V. Desyatov ORCID: 0000-0002-4570-7427*, T. A. Pavlishcheva ORCID: 0000-0002-9395-9311*
 I. B. Sibiryakova ORCID: 0000-0002-7142-6688*, I. M. Kostanov ORCID: 0000-0002-4360-2170*
 A. V. Kolesnikov ORCID: 0000-0002-4586-6612*
 D. Mendelev University of Chemical Technology of Russia,
 20, Geroyev Panfilovtsev St., Moscow, Russia, 125480,
 e-mail: pochitalkina@list.ru

The article is devoted to the problem of neutralization of industrial wastewater containing highly toxic chlorides, sulfates, nitrates, ions of heavy and non-ferrous metals. Wastewater, as a rule, has an acidic reaction, and the first stage of its neutralization consists in the use of alkaline reagents (NaOH , Na_2CO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$) to neutralize and form hybrid sediments of iron, aluminum and other metals. The total concentration of salt components in technological solutions ranges from 10 to 100 g/L, most often it is a mixture of Na_2SO_4 , NaCl , NaNO_3 , less often other salts. The technology of deep processing of mineralized water consists in softening, filtration on pressure filters and microfiltration of industrial

waste. The peculiarity of the proposed scheme lies in the use of the reverse osmosis method of desalting, according to which it is concentrated by 3–5 times and evaporated to a salt content of 200–300 g/L. This scheme allows you to obtain concentrate and fresh water that meets environmental requirements. After water demineralization, the concentrate goes to isohydric crystallization with $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ by cooling to 0 °C. After centrifugation of the pulp, the mother liquor is mixed with the initial stream and sent to a reverse osmosis unit, and the crystalline hydrate is sent to drying to obtain anhydrous technical salt.

On the example of a model technological solution that simulates liquid industrial waste from mining enterprises, with the help of computational and experimental studies, the fundamental possibility of obtaining anhydrous sodium sulfate by means of intracycle isohydric crystallization of a concentrate after a reverse osmosis plant has been shown. A schematic diagram of the neutralization of liquid inorganic waste of I and II hazard classes with the production of a secondary product, Na_2SO_4 , is proposed; the possibility of isomorphic capture of impurities during its crystallization is estimated.

Keywords: waste water, neutralization, industrial waste, crystallization, reverse osmosis membranes.

Добыча и переработка полезных ископаемых на горнодобывающих предприятиях сопровождается образованием большого количества различного вида отходов, среди которых особую экологическую опасность представляют сточные воды. Их особенностью является высокая минерализация и поликомпонентный состав. Кроме того, они содержат в себе большое количество взвешенных и коллоидных частиц, бактериальные загрязнения, включая продукты жизнедеятельности микроорганизмов, а также токсичные соединения тяжёлых металлов. Значительная часть сточных вод представлена растворами сульфатов и хлоридов. В частности, переработка сильвинитовых руд, являющихся сырьём для получения хлорида калия, и, представляющих горную породу непостоянного состава с чередующимися слоями галита (NaCl) и сильвина (KCl), сопутствующими примесями в виде алюмосиликатов ($\text{Na}(\text{Fe}, \text{Mg})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), гипса (CaSO_4) и др., сопровождается образованием твёрдых и жидких отходов в виде галитовых хвостов, глинисто-солевых шламов, техногенных рассолов и пылегазовых выбросов [1, 2]. Так, при получении 1 т KCl в зависимости от состава руды образуется 3,5–4,0 т галитовых отходов [3]. Согласно исследованиям авторов [4, 5], галитовые отвалы имеют следующий состав (в %): NaCl – 91,0–96,0; KCl – 0,2–2,5; MgCl_2 – 0,2; CaSO_4 – 2–3; нерастворимый остаток – 1,0–1,5. Кроме того, в их составе могут присутствовать примеси брома, а при флотационном обогащении руд – флотореагенты до 8–10 г/т и другие компоненты [6, 7]. Суммарная концентрация растворённых солей в глинисто-солевых шламах достигает 200 г/л [8].

Поступление таких многокомпонентных систем в окружающую среду приводит к локальному засолению почвы, загрязнению подземных и поверхностных вод, оказывая негативное влияние на экосистемы [9, 10]. Кроме того, сброс минерализованных сточных

вод в поверхностные водоёмы исключает возможность использования последних для промышленных и хозяйственно-бытовых нужд ввиду их загрязнения.

Аналогичные проблемы возникают при переработке жидких промышленных отходов, содержащих кислоты, щёлочи, неорганические соли, в том числе I и II классов опасности, с содержанием 50–100 кг/м³. В процессе их переработки используется серная кислота и едкий натр, что приводит после стадий нейтрализации и осаждения к образованию сточных вод с высокой концентрацией минеральных солей, в том числе сульфата натрия [11].

Рост требований к экологической безопасности сточных вод способствует разработке более эффективных способов их очистки, среди которых реагентное осаждение, ионный обмен, а также мембранная технология. Переработка отходов, имеющих ресурсный потенциал, может решить проблему ресурсосбережения и получения вторичного сырья и продуктов для смежных производств [12–14].

Мембранные методы очистки являются перспективными. Так, обратноосмотическое обессоливание минерализованных сточных вод позволяет получить пресную воду, соответствующую экологическим требованиям, и концентрат, из которого с помощью определённых операций можно получить вторичные продукты, одним из которых является сульфат натрия. Вторичные продукты направляются потребителю и не требуют складирования, а удаление солей из концентрата снижает экологическую нагрузку при сбросе сточных вод [15–18].

Разработана авторская технология, по которой исходная вода после умягчения, фильтрации на напорных фильтрах и микрофильтрации направляется на обратноосмотические мембраны. Концентрат после обессоливания воды поступает на изогидрическую кристаллизацию десятиводного сульфата натрия (мирабилит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) путём охлажде-

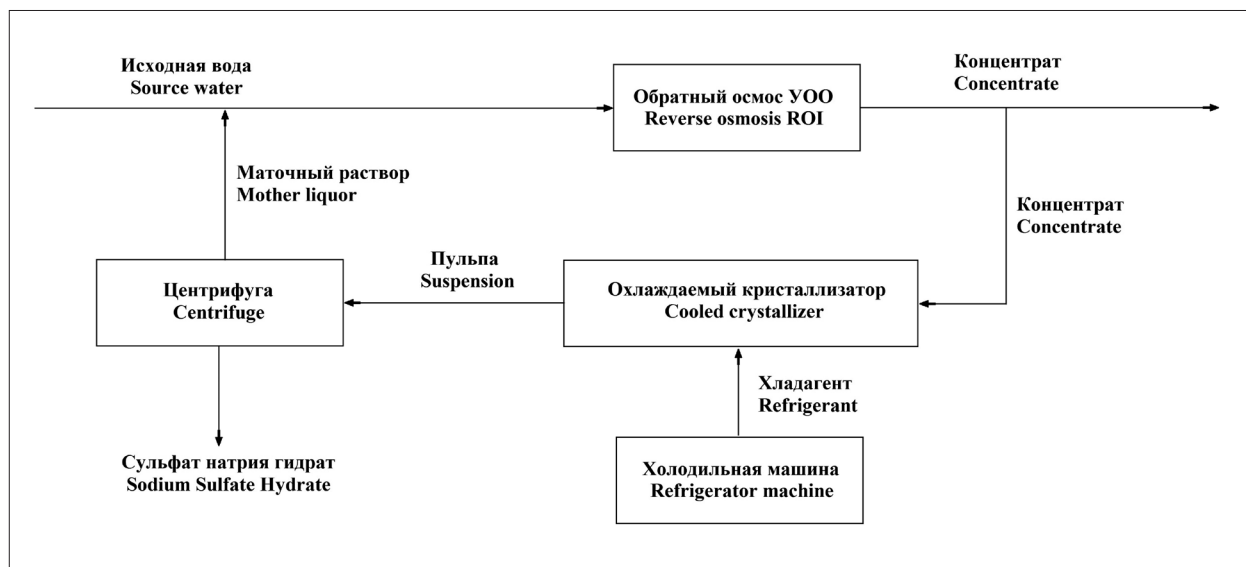


Рис. 1. Технологическая схема кристаллизации мирабилита
 Fig. 1. Technological scheme of mirabilite crystallization

ния до температуры близкой к 0 °С (рис. 1). После центрифугирования пульпы маточный раствор вновь подаётся на вход в установку обратного осмоса, смешиваясь с исходной водой. Мирабилит направляется на сушку для получения безводного сульфата натрия. Процессы кристаллизации солей рассмотрены в работах [17, 18].

Целью настоящего исследования являлось экспериментальное изучение процесса кристаллизации мирабилита из водного раствора смеси солей сульфатов, хлоридов, нитратов, гидрокарбонатов натрия с начальной концентрацией сульфата натрия более 100 г/дм³.

Объекты и методы исследования

Исходный раствор объёмом 1 дм³, химический состав которого указан в таблице 1, а также технологические растворы на стадиях переработки исходного раствора, химический состав которых указан в таблице 2, представляют собой средние арифметические значения трёх экспериментальных определений и их

погрешность при доверительной вероятности $P = 0,95$. Для определения составов исследуемых растворов использовали стандартные методы химического анализа.

Для физико-химических исследований использовали одноканальный рН-метр (Эконикс-Эксперт-001), одноканальный кондуктометр (Эконикс-Эксперт-002), термостат-криостат (Julabo F12), центрифугу (ОПН-3.02), сушильный шкаф (ШС-80-01 СПУ), обратно-осмотическую установку.

Расчётное значение электропроводности водного раствора сульфата натрия ($C = 117,0 \pm 1,6$ г/дм³) с использованием [19] составило 115 мСм/см, экспериментальное значение – 98 мСм/см. Исходя из расчётного и экспериментального значений электропроводности раствора сульфата натрия в воде, был принят коэффициент учёта взаимного влияния ионов ($K_{\text{ввн}} = 85\%$), который использовали для расчёта электропроводности образующихся технологических растворов в процессе очистки.

Исходный раствор охлаждали в холодильной камере до температуры 0 °С.

Таблица 1 / Table 1

Химический состав исходного раствора
 Chemical composition of the initial solution

Состав / Structure	Концентрация, г/дм ³ / Concentration, g/dm ³
Na ₂ SO ₄	117,0±1,6
NaCl	14,0±0,3
NaNO ₃	7,0±0,2
NaHCO ₃	1,01±0,02

Результаты и обсуждение

При температуре около 10 °С отмечали образование кристаллов мирабилита. По достижении постоянного значения электропроводности при температуре, близкой к 0 °С, осадок отфильтровывали, после чего маточный раствор нагревали до температуры 25 °С, при которой измеряли его электропроводность.

Масса влажного отфильтрованного осадка с влагосодержанием 20% составила 199,7 г. Масса прокалённого при 100–150 °С сульфата натрия составила 70,0 г (в пересчёте на мирабилит 158,7 г). Значения электропроводности раствора до начала проведения эксперимента, после осаждения при 0,9 °С и после нагрева маточного раствора до 25 °С составили 98,2, 60,5 и 68,9 мСм/см соответственно. Для оценки полученных результатов построены зависимости электропроводности от мольной концентрации Na₂SO₄ и NaCl (рис. 2).

В таблице 2 представлены исходные значения содержания индивидуальных ком-

понентов (C_1 , моль/дм³), а также значения их удельной электропроводности (G , мСм/см: G_1 – исходное расчётное значение электропроводности, G_2 – экспериментальное значение электропроводности, G_3 – значение электропроводности маточного раствора, G_4 – значение электропроводности маточного раствора с учётом потерь воды).

Основываясь на предположении, что осадок состоит только из сульфата натрия и воды, получены значения электропроводности сульфата натрия в маточном растворе 40,4 мСм/см или с учётом $K_{\text{ввн}} = 47,5$ мСм/см. Исходя из этого, эквивалентная концентрация сульфата натрия в оставшемся растворе составляет 0,39 моль/дм³ или 55 г/дм³, а масса кристаллов со структурой мирабилита – 62 г.

Однако, с учётом потерь воды и изменения объёма раствора (0,89 дм³), эквивалентная концентрация сульфата натрия составляет 36,7 мСм/см или с учётом $K_{\text{ввн}} = 43,2$ мСм/см. Тогда концентрация в маточном растворе составит 0,34 моль/л или 48 г/л. При этом

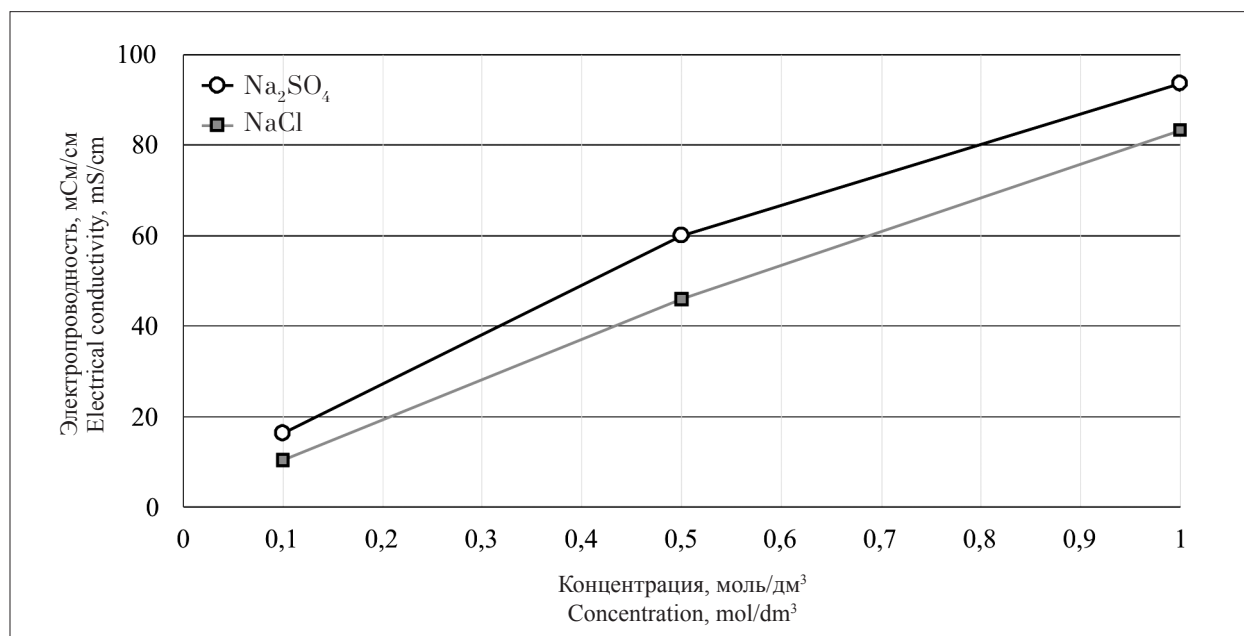


Рис. 2. Зависимость электропроводности раствора от концентрации Na₂SO₄ и NaCl
 Fig. 2. Dependence of the electrical conductivity of the solution on the concentration of Na₂SO₄ and NaCl

Таблица 2 / Table 2

Результаты эксперимента / Experimental result)

Компонент Component	C_1 , моль/дм ³ , C_1 , mol/dm ³	G_1 , мСм/см G_1 , mS/cm	G_2 , мСм/см G_2 , mS/cm	G_3 , мСм/см G_3 , mS/cm	G_4 , мСм/см G_4 , mS/cm
Na ₂ SO ₄	0,82±0,03	81,6±1,6	69,4±1,4	40,4±0,8	36,7±0,8
NaCl	0,24±0,01	22,8±0,4	19,4±0,4	19,4±0,4	21,8±0,4
NaNO ₃	0,082±0,002	9,70±0,19	8,20±0,16	8,2±0,2	9,3±0,2
NaHCO ₃	0,012±0,001	1,14±0,02	0,97±0,02	0,97±0,02	1,10±0,02
Σ	1,154±0,024	115,0±1,6	98,0±1,4	69,0±0,8	69,0±0,8

Таблица 3 / Table 3

Состав воды, принятый в расчётной модели
The composition of the water adopted in the design model

Анализируемая вода Analyzed water	Состав, мг/дм ³ / Composition, mg/dm ³												ОС, моль/дм ³ TDS, mol/dm ³	pH
	Fe ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻		
Исходная вода Source water	0,16	40	35	50	82600	500	149970	11905	3650	0,050	5,42	5373	254158	6,0
На входе в кристаллизатор At the entrance to the crystallizer	1,32	53,4	63,1	66,7	49571	667	73916	15880	4869	0,066	5,14	6848	151907	6,0
На выходе из кристаллизатора At the output from the crystallizer	1,32	53,4	63,1	66,7	27110	667	27042	15880	4869	0,066	4,31	6814	82605	6,1

изменение концентрации сульфата натрия, полученное расчётным путём, равно 69 г, что согласуется с экспериментально полученным значением 70 г. В пересчёте на мирабилит, предполагаемый выход составил 156,5 г, что также сопоставимо с экспериментально полученным значением 158,7 г.

Исходная вода поступает в установку обратного осмоса. Большая часть солевого концентрата после обратноосмотической установки направляется в кристаллизатор, в котором при охлаждении до температуры близкой к 0 °С образуются кристаллы мирабилита. Суспензия подаётся в центрифугу, где маточный раствор отделяется от осадка и направляется на вход в установку обратного осмоса, смешиваясь при этом с исходной водой. Другая часть концентрата после обратноосмотической установки отводится на дальнейшую утилизацию, например, в выпарную установку для получения смешанных солей натрия. Значения водородного показателя (рН, ед.), общее солесодержание (ОС, моль/дм³), а также исходный состав воды на входе в установку обратного осмоса, и расчётные составы воды на входе в кристаллизатор и на выходе из него представлены в таблице 3.

Проведён расчёт параметров потоков воды при получении товарного сульфата натрия при обратноосмотическом обессоливании минерализованных сточных вод указанного в таблице 3 состава с внутрицикловой изогидрической кристаллизацией. При расходе исходных минерализованных сточных вод (2,5 м³/ч) и пермеата (0,98 м³/ч) после обратноосмотической установки, расход концентрата на выходе из обратноосмотической установки, составляет 5,5 м³/ч. Большая его часть –

4,4 м³/ч возвращается в рецикл, а 1,1 м³/ч отводится на дальнейшую утилизацию. Смешанный поток, состоящий из исходных минерализованных сточных вод и концентрата после обратноосмотической установки, с общим расходом 6,9 м³/ч направляется в кристаллизатор, где в результате охлаждения выделяется 0,6 м³/ч мирабилита в пересчёте на кристаллогидрат. После кристаллизатора поток снова подогревается и с расходом 6,3 м³/ч направляется на вход обратноосмотической установки. Рабочее давление в обратноосмотической установке не превышает 60 бар.

На основании экспериментальных данных показано, что из 2,5 м³/ч минерализованных сточных вод может быть получено около 450 кг/ч безводного сульфата натрия.

С помощью расчётно-экспериментальных исследований показана принципиальная возможность получения безводного сульфата натрия путём внутрицикловой изогидрической кристаллизации концентрата после обратноосмотической установки при очистке минерализованных сточных вод. Предложенный способ обеспечивает получение пресной воды, а также вторичного сырья в виде соли.

Указанный подход заложен при проектировании промышленно-технологических комплексов обезвреживания неорганических отходов I и II классов опасности [20].

В частности, после обезвреживания растворов (95 видов), твёрдых осадков и пастообразных отходов технологические растворы подаются на линию обессоливания, где запроектированы два модуля: обратного осмоса и выпаривания. В результате концентрирования технологических растворов, содержащих смесь минеральных солей (сульфаты, хлори-

Таблица 4 / Table 4

Растворимость некоторых солей в водных растворах [21]
Solubility of some salts in aqueous solutions [21]

Растворимость солей, г/100 г раствора (t = 0 °C) Solubility of salts, g/100 g of solution (t = 0 °C)		
NaX _{an}	KX _{an}	NH ₄ X _{an}
NaCl – 35,7	KCl – 28,0	NH ₄ Cl – 29,4
NaF – 4,1	KF – 44,7	NH ₄ F – 71,9
NaI – 159,7	KNO ₃ – 13,1	NH ₄ NO ₃ – 122
NaNO ₃ – 72,7	KSCN – 177	NH ₄ I – 154
NaSCN – 93,4	KI – 127	NH ₄ SCN – 119,8
NaHCO ₃ – 6,9	KHCO ₃ – 22,7	NH ₄ HCO ₃ – 11,9
Na ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄ – 7,18	(NH ₄) ₂ SO ₄ – 70,1

ды, нитраты, карбонаты и другие) можно получить обессоленную воду (пермеат), концентрат хорошо растворимых солей, из которых после изогидрической кристаллизации выделяют осадок Na₂SO₄ · 10H₂O.

В то же время селективное выделение из технологических растворов солей, образованных ионами натрия, калия, аммония и хлорид-, нитрат-, сульфат-ионами существенно усложняется вследствие близких значений растворимости некоторых из них (табл. 4) [21–24] и наличия признаков изоморфизма: 1) отклонение размера ионов не должно превышать 10–15% (по правилу Гольдшмидта); 2) близость химических свойств элементов, замещающих друг друга; 3) сохранение электронейтральности кристаллической структуры минерала (допускаемое отклонение менее 0,4) [22], свойственных Na⁺ и K⁺, а также NO₃⁻ и SO₄²⁻.

Анализ литературных данных [21–23] указывает на возможность сокристаллизации солей Na₂SO₄ и K₂SO₄ вследствие изоморфного замещения иона Na⁺ (r = 0,098 нм) ионом K⁺ (r = 0,133 нм) и образования фазы переменного состава [20] при наличии в растворе растворимых солей калия и ионов NO₃⁻ (r = 0,257 нм) и SO₄²⁻ (r = 0,295 нм) [21].

Заключение

С помощью расчётно-экспериментальных исследований показана принципиальная возможность получения безводного сульфата натрия путём внутрицикловой изогидрической кристаллизации концентрата после обратно-осмотической установки при очистке минерализованных сточных вод. Предложенный способ обеспечивает получение пресной воды, а также вторичного сырья в виде технической соли Na₂SO₄, которая может содержать при-

меси ионов K⁺ и NO₃⁻ вследствие изоморфных замещений в кристаллической решётке. Указанный подход заложен при проектировании промышленно-технологических комплексов обезвреживания неорганических отходов I и II классов опасности.

References

1. Kudryashov A.I. Verkhnekamskoe salt deposit. Perm: GI UrO RAN, 2001. 429 p. (in Russian).
2. Bachurin B.A., Baboshko A.Yu. Ecological and geochemical characteristics of potash production waste // Gornyy zhurnal. 2008. No. 10. P. 88–91 (in Russian).
3. Akhmetov T.G., Akhmetova R.T., Gaysin L.G., Akhmetova L.T. Khimicheskaya tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv. Kniga 1. Sankt-Peterburg: Lan, 2016. 688 p. (in Russian).
4. Maksimovich N.G., Khairulina E.A. Fundamentals of environmental monitoring in the development of the potash salt deposit // Inzhenernye izyskaniya. 2012. No. 8. P. 20–30 (in Russian).
5. Timonin A.S. Engineering and environmental reference. V. 3. Kaluga: N. Bochkareva Publishing House, 2003. 1024 p. (in Russian).
6. Savon D.Yu., Shevchuk S.V., Shevchuk R.V. Reducing the impact of potash industry waste on the environment // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten. 2016. No. 8. P. 360–368 (in Russian).
7. Mineral and raw materials resources of the Perm Region / Ed. A.I. Kudryashova. Perm: Book square, 2006. 464 p. (in Russian).
8. Nisina O.E. Development of technological bases for ultrasonic cleaning of halite raw materials from calcium sulfate impurities: Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of technical Sciences. Perm, 2020. 17 p. (in Russian). doi: 10.6060/ivkkt.20186112.5850
9. Liskova M.Yu. Negative impact on the environment by enterprises for the extraction and enrichment of potassium-magnesium salts // Vestnik PNIPU. Geologiya.

Neftegazovoe i gornoe delo. 2017. V. 16. No. 1. P. 82–88 (in Russian). doi: 10.15593/2224-9923/2017.1.9

10. Akhtyamov R.G., Titova T.S. Geocological problems of ensuring safety in waste management. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2016. 109 p. (in Russian).

11. Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Bogatyreva N.N., Kantor G.Ya. Glauconites of the Vyatka-Kama phosphorite-bearing basin // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 2. P. 117–122 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-117-122

12. Heimovaara T.J., Bun A., Van Turnhout A.G. Water balance modeling for estimation of residence time of water in a full-scale landfill using a data-assimilation approach // InHPM6: The 6th International Workshop Hydro-Physico-Mechanics of Landfills, Delft. The Netherlands, 2015. P. 10–14.

13. Shulenina Z.M., Bagrov V.V., Desyatov A.V., Zubkov A.A., Kamrukov A.S., Kolesnikov V.A., Konstantinov V.E., Ksenofontov B.S., Novikov D.O. The water is man-made. Problems, technologies, resource value. Moskva: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2015. 401 p. (in Russian).

14. Posin M.E. Mineral salt technology. Part 1. Leningrad: Khimiya, 1974. 768 p. (in Russian).

15. Dytnersky Yu.I. Baromembrane processes. Theory and calculation. Moskva: Khimiya, 1986. 272 p. (in Russian).

16. Palgunov P.P., Sumarokov M.V. Utilization of industrial waste. Moskva: Stroyizdat, 1990. 352 p. (in Russian).

17. Shikheeva L.V., Zyryanov V.V. Sodium sulfate. Property and production. Leningrad: Khimiya, 1978. 240 p. (in Russian).

18. Frolovsky E.E. Production of sodium sulfate from lake brines Kuchuk. Sankt-Peterburg: St. Petersburg Publishing House, 2001. 444 p. (in Russian).

19. Vasiliev V.P. Thermodynamic properties of electrolyte solutions. Moskva: Vysshaya shkola, 1982. 320 p. (in Russian).

20. Petropavlovsky I.A., Dmitrevsky B.A., Levin B.V., Pochitalkina I.A. Chemistry and fundamentals of mineral fertilizers technology. Sankt-Peterburg: Nauka, 2021. 344 p. (in Russian).

21. Kolesnikov V.A., Menshutina N.V., Desyatov A.V. Equipment, technologies and design of wastewater treatment systems. Moskva: Delhi Plus, 2016. 289 p. (in Russian).

22. Lurie Yu.Yu. Handbook of analytical chemistry. Fourth edition, revised and supplemented. Moskva: Khimiya, 1971. 456 p. (in Russian).

23. Zherin I.I., Amelina G.N. Fundamentals of radiochemistry, methods of isolation and separation of radioactive elements. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2009, 196 p. (in Russian).

24. Khentov V.Ya., Semchenko V.V., Shachneva E.Yu. Processes of complex formation of natural and technogenic origin: monograph. Moskva: RUSAINS, 2017. 266 p. (in Russian).