

УТИЛИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОКОВ ТИТАНОМАГНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2019 г. **Н.А. Куленова, З.М. Ахметвалиева, С.В. Мамяченков, О.С. Анисимова**

Восточно-Казахстанский государственный технический университет (ВКГТУ) им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Респ. Казахстан

Уральский федеральный университет (УрФУ) им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 13.06.18 г., доработана 11.10.18 г., подписана в печать 15.10.18 г.

Приведены результаты исследований по утилизации сбросных стоков металлургического предприятия с использованием методов центрифугирования и вакуумной возгонки. Объектом изучения являлись промышленные стоки титаномагниевого производства. Исследовано влияние скорости вращения центрифуги, продолжительности, температуры и содержания твердого на процесс разделения промышленных стоков на жидкую (фугат) и твердую (осадок) фазы. Для оценки влияния каждого фактора проводили комплекс исследований, основанных на использовании методики многофакторного планирования эксперимента. Установлены оптимальные параметры центрифугирования: скорость вращения ротора – 3000 об/мин, продолжительность – 30 мин. В полученном растворе (фугате) содержание взвешенных веществ составило 195 мг/дм³, хлоридов – 26500 мг/дм³, сухого остатка – 39750 мг/дм³, что свидетельствует о его высокой минерализации и необходимости дальнейшей очистки. В лабораторных условиях показана целесообразность применения термического метода деминерализации фугатов с использованием роторного вакуумного испарителя. Определены оптимальные параметры процесса: $t = 70$ °С, $P_{\text{остат}} < 50$ мбар, $\tau = 30$ мин. Выход остатка после вакуумной возгонки – 6 % от массы фугата. В полученном конденсате не обнаружено взвешенных веществ, содержание хлоридов составило 50 мг/дм³. Предлагаемая технология утилизации промышленных стоков титаномагниевого производства будет способствовать созданию замкнутого цикла водоснабжения на предприятии. Остаток, полученный после вакуумной возгонки фугата, содержащий в основном хлориды щелочных и щелочно-земельных металлов, можно рекомендовать в качестве добавки для приготовления противогололедных материалов, а также буровых растворов и растворов для глушения скважин.

Ключевые слова: промышленные стоки, титаномагниевого производство, центрифуга, фугат, деминерализация, роторный вакуумный испаритель, конденсат.

Куленова Н.А. – канд. техн. наук, доцент, зав. науч.-произв. комплексом «Металлургия» ВКГТУ (070010, Респ. Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева, 19). E-mail: 3007kulenova53@gmail.com.

Ахметвалиева З.М. – PhD докторант ВКГТУ. E-mail: zakhmetyali@gmail.com.

Мамяченков С.В. – докт. техн. наук, проф. кафедры металлургии тяжелых цветных металлов (МТЦМ) УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17, оф. С-108). E-mail: svmamychenkov@yandex.ru.

Анисимова О.С. – канд. техн. наук, доцент кафедры МТЦМ УрФУ. E-mail: osanis@mail.ru.

Для цитирования: Куленова Н.А., Ахметвалиева З.М., Мамяченков С.В., Анисимова О.С. Утилизация промышленных стоков титаномагниевого производства. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2019. No. 1. С. 25–33.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-1-25-33.

Kulenova N.A., Akhmetvalieva Z.M., Mamyachenkov S.V., Anisimova O.S.

Disposal of titanium-magnesium production industrial effluents

The results of a study on the disposal of waste discharge at the iron and steel works using centrifugation and vacuum sublimation methods are presented. The object of the study was industrial effluents of titanium-magnesium production. The influence of centrifuge rotation speed, duration, temperature and fraction of solid phase on the process of industrial effluent separation into liquid (fugate) and solid (sediment) phases is studied. A complex of studies based on the multifactor experiment design was carried out to evaluate the effect of each of these factors. Optimum centrifugation parameters were established: rotor speed – 3000 rpm and duration – 30 min. The obtained solution (fugate) contained 195 mg/dm³ of suspended matter, 26500 mg/dm³ of chlorides, 39750 mg/dm³ of dry residue, which indicates its high mineralization and the need for further purification. The expediency of a thermal method of fugate demineralization using a rotary vacuum evaporator was demonstrated in laboratory conditions. Optimum process parameters were determined: temperature 70 °С, residual pressure – less than 50 mbar, duration – 30 min. Residue yield after vacuum sublimation was 6 % of the fugate weight. No suspended substances were found in the obtained condensate, and chloride content was 50 mg/dm³. The proposed technology for the disposal of industrial effluents at titanium-magnesium production will facilitate forming a closed

water supply cycle at the enterprise. Residue obtained after the fugate vacuum sublimation containing mainly chlorides of alkali and alkaline earth metals can be recommended to use as an additive for the preparation of anti-ice materials, as well as drilling fluids and kill mud.

Keywords: industrial effluents, titanium-magnesium production, centrifuge, fugate, demineralization, rotary vacuum evaporator, condensate.

Kulnova N.A. — Cand. Sci. (Tech.), associate prof., head of research and production complex «Metallurgy» of East Kazakhstan State Technical University (EKSTU) n.a. D. Serikbayev (070010, Kazakhstan, Ust'-Kamenogorsk city, Serikbayev str., 19). E-mail: 3007kulnova53@gmail.com.

Akhmetvalieva Z.M. — PhD student of EKSTU. E-mail: zakhmetyali@gmail.com.

Mamyachenkov S.V. — Dr. Sci. (Tech.), prof. of Department of metallurgy of heavy non-ferrous metals of Ural Federal University (620002, Russia, Ekaterinburg city, Mira str., 17, off. C-108). E-mail: svmamyachenkov@yandex.ru.

Anisimova O.S. — Cand. Sci. (Tech.), associate prof. of Department of metallurgy of heavy non-ferrous metals of Ural Federal University. E-mail: osanis@mail.ru.

Citation: Kulnova N.A., Akhmetvalieva Z.M., Mamyachenkov S.V., Anisimova O.S. Disposal of titanium-magnesium production industrial effluents. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2019. No. 1. P. 25–33 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-1-25-33.

Введение

В процессе производства титана и магния образуется большое количество промышленных стоков (промстоков), оказывающих негативное влияние на окружающую среду. Согласно имеющейся в литературе информации, традиционными способами утилизации таких стоков являются реагентные, основанные на реакциях нейтрализации и осаждения [1–3].

В настоящее время промышленные стоки титаномагниевого производства поступают в искусственные сооружения — так называемые шламонакопители, где происходит их естественное отстаивание. Объем образующихся осадков достигает на некоторых титаномагниевого производствах до 90 тыс. м³/год [3]. В процессе отстаивания промстоков образуется жидкая фаза, представляющая собой минерализованный раствор с рН = 2–13, содержащий хлориды и сульфаты различных металлов (Na, K, Ca, Mg, Al, Ti, Fe и др.). Содержание хлоридов в жидкой фазе промстоков достигает 20–40 г/дм³, что затрудняет дальнейшую их переработку и приносит значительный экологический ущерб.

Переполнение существующих шламонакопителей на титаномагниевого производствах промышленными отходами срочно требует принятия мер по их утилизации [4]. Это приводит, как правило, к противоречию между экономикой производства и дополнительными затратами на решение экологических задач.

Поэтому оптимальным решением данной проблемы на первом этапе будут являться снижение

объемов образующихся отходов и обеспечение замкнутого водооборота на предприятии, что позволит при небольших затратах уменьшить экологическую нагрузку.

Довольно подробно исследованы различные способы деминерализации промышленных стоков титаномагниевого производства: ионообменные, мембранные и электрохимические [5–14]. Но ни один из этих методов не нашел практического применения. Для методов ионного обмена характерны высокая стоимость сорбентов и длительная водоподготовка, метод обратного осмоса отличают высокая стоимость и необходимость утилизации высококонцентрированных рассолов [13, 15–17]. Кроме того, применение того или иного метода ограничено содержанием солей в утилизируемых стоках.

Для очистки сильно минерализованных сточных вод, содержащих соли кальция, магния и др. предпочтительно использовать термические методы. Очищенную воду получают в основном путем ее испарения в специальных установках. В некоторых случаях применяют огневой метод, при котором сточные воды распыляют непосредственно в топочные горячие газы. При этом вода полностью испаряется, органические примеси сгорают, а минеральные вещества превращаются в твердые или расплавленные частицы, которые затем улавливаются.

Цель данной работы — снижение отрицательного воздействия отходов титаномагниевого производства на окружающую среду путем сокраще-

ния количества твердых отходов и утилизации жидкой части.

Для достижения поставленной цели был исследован процесс утилизации промышленных стоков титаномагниевого производства с использованием методов центрифугирования и выпаривания в вакууме при низких температурах до требований технологических норм оборотного водоснабжения с получением остатков в твердом виде, что удобно при их утилизации, транспортировке, а также при захоронении.

Экспериментальная часть

Объектом исследования являлись промстоки титаномагниевого производства, направляемые в шламонакопители и представляющие собой пульпу темно-коричневого цвета с зеленоватым оттенком.

Отбор пробы промстоков осуществляли в соответствии с методическими указаниями по отбору проб для анализа сточных вод [18].

Химический и фазовый составы объекта исследования определяли с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой «ISP-MS Agilent» (Agilent Technologies, США), рентгенофлуоресцентного спектрометра СРВ-1М (Техноаналит, Казахстан), растрового электронного микроскопа JSM-6390 LV (JEOL Ltd, Япония) с системой дисперсионного микроанализа (OXFORD Instruments Analytical Limited, Великобритания), рентгеновского дифрактометра «PANalytical X'Pert PRO» (PANalytical, Нидерланды). Сухой остаток, рН, содержание сульфатов и влажность анализировали с использованием стандартных методик измерения [18–22].

Промышленные стоки разделяли на твердые остатки и жидкую часть с помощью центрифуги ELMi CM-6M.01 (Elmi Ltd., Латвия). Твердый остаток I после 3-кратной промывки дистиллированной водой сушили при температуре $t = 100 \pm 110$ °С до постоянной массы и анализировали химический состав на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой. Изучали влияние скорости вращения центрифуги и времени на процесс разделения промстоков на жидкую (фугат) и твердую (остаток I) фазы.

Исследование процесса деминерализации промстоков титаномагниевого производства проводили на роторном вакуумном испарителе IKA-RV 10 (IKA®-Werke GmbH & Co. KG, Германия) при $t =$

50 ± 70 °С. Упаривание с помощью роторных (плочных) испарителей — наиболее эффективный способ удаления воды и растворителей при низких температурах. Колба с упариваемой жидкостью, вращающаяся в наклонном положении вокруг своей оси, присоединена к водяному холодильнику и источнику вакуума. При вращении колбы на ее внутренней поверхности постоянно образуется пленка жидкости, а внешняя поверхность равномерно нагревается на бане. В этих условиях перегрев и вскипание жидкости исключаются, а испарение, благодаря большой поверхности, протекает очень быстро.

На рис. 1 представлена схема проведения экспериментов по утилизации промышленных стоков титаномагниевого производства, включающая разделение стоков на твердую и жидкую фазы на центрифуге и деминерализацию полученного фугата на роторном вакуумном испарителе.

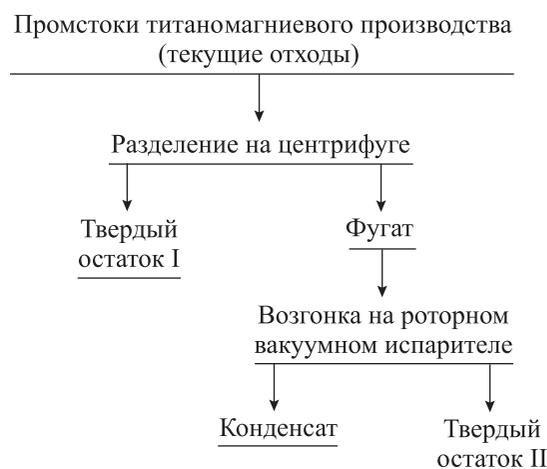


Рис. 1. Схема проведения экспериментов по утилизации промышленных стоков титаномагниевого производства

Результаты и их обсуждение

При исследовании выделения взвешенных веществ в промышленных стоках титаномагниевого производства под действием центробежных сил изучалось влияние скорости вращения центрифуги, продолжительности, температуры и доли твердой фазы в суспензии на процесс разделения промстоков на жидкую (фугат) и твердую (осадок) фазы. Для оценки влияния каждого из перечисленных факторов на степень отделения твердого остатка, содержащего Ti, V, Zr, Nb, Ca, Mg, Zn, Fe, Cu, Cr,

Mn, Al, Na, K, Li, проводили комплекс исследований, основанных на использовании методики многофакторного планирования эксперимента. Для обработки полученных экспериментальных данных применены нелинейная множественная корреляция и формула М.М. Протодяконова, которая в сочетании с матрицей планирования эксперимента позволила изучить влияние 4-х факторов на результаты исследований. Уровни варьируемых факторов представлены в табл. 1. Эффективность процесса центрифугирования оценивали на основании результатов анализа фугата и твердого остатка. Полученные результаты представлены в табл. 2.

С увеличением скорости и продолжительности центрифугирования наблюдалось снижение значений всех параметров отклика, при этом влажность твердого остатка с повышением скорости центрифугирования уменьшалась в 1,36 раза (рис. 2, а), при увеличении времени центрифугирования — в 1,04 раза (рис. 2, б).

Зависимость остальных показателей от изменения скорости и времени центрифугирования, температуры суспензии и доли твердой фазы в ней

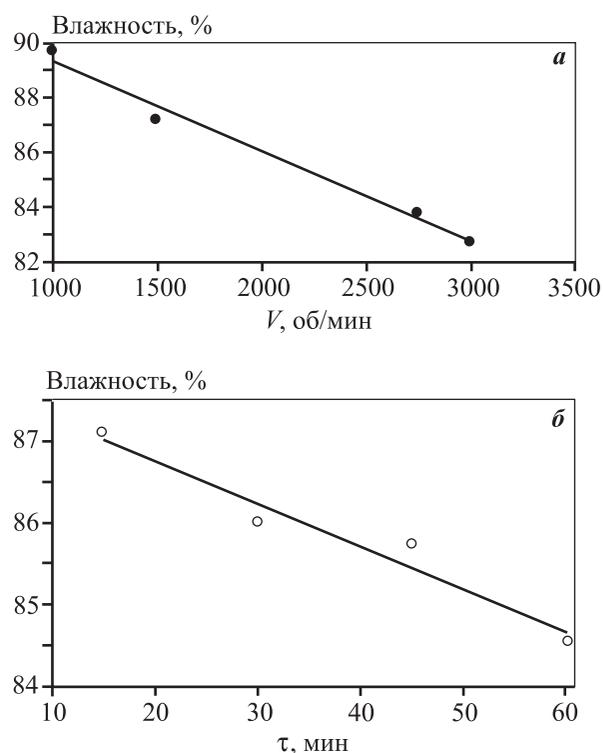


Рис. 2. Зависимость влажности остатка от скорости (а) и времени (б) центрифугирования

Таблица 1

Уровни факторов при оптимизации параметров центрифугирования текущих отходов

Номер фактора	Фактор	Уровень			
		1	2	3	4
1	Скорость вращения центрифуги, об/мин	1000	1500	2750	3000
2	Время центрифугирования, мин	15	30	45	60
3	Температура, °С	10	20	25	30
4	Доля твердой фазы в суспензии	14	20	33	50

Таблица 2

Результаты анализа фугата и твердого остатка после центрифугирования

№ эксперимента	pH	ω (H ₂ O), %	Содержание сухого остатка, мг/дм ³	№ эксперимента	pH	ω (H ₂ O), %	Содержание сухого остатка, мг/дм ³
1	7,30	91,87	36076	9	7,35	88,30	36054
2	7,31	86,04	23378	10	7,15	85,03	24581
3	7,26	82,55	25478	11	7,32	87,06	24978
4	7,18	82,13	28767	12	7,30	84,95	27591
5	7,31	90,60	38754	13	7,33	88,09	35370
6	7,33	90,35	24039	14	6,89	87,41	35856
7	7,24	82,94	26013	15	7,22	82,49	25106
8	7,28	82,10	26368	16	7,30	81,80	28319

Таблица 3

Коэффициент корреляции (R) и его значимость (t_R) для частных функций параметров отклика

Параметр отклика	R	t_R	Параметр отклика	R	t_R
pH	0,8449	2,86	Zn, мг/дм ³	0,8726	6,68
Влажность, %	0,8887	7,25	Fe, мг/дм ³	0,8707	6,63
Сухой остаток, мг/дм ³	0,8639	6,42	Cu, мг/дм ³	0,7357	4,06
Ti, мг/дм ³	0,8658	6,47	Cr, мг/дм ³	0,8270	5,50
V, мг/дм ³	0,8681	6,54	Mn, мг/дм ³	0,8392	5,77
Zr, мг/дм ³	0,8103	5,17	Al, мг/дм ³	0,8902	7,31
Nb, мг/дм ³	0,7980	4,95	Li, мг/дм ³	0,7585	4,36
Ca, мг/дм ³	0,8847	7,10	Na, мг/дм ³	0,6536	3,23
Mg, мг/дм ³	0,8639	6,42	K, мг/дм ³	0,6114	2,89

выражается линейными и полиномиальными зависимостями.

На основании выведенных обобщенных уравнений Протодьяконова для каждого параметра отклика рассчитаны значения коэффициента корреляции и его значимости (табл. 3).

Превышение t_R критического значения коэффициента Стьюдента (2,25) свидетельствует об адекватности обобщенных уравнений. По результатам анализа выведенных функций для каждого отклика выбраны оптимальные режимы процесса центрифугирования:

- скорость центрифугирования — 3000 об/мин;
- время центрифугирования — 30 мин;
- температура — 25 °С;
- доля твердой фазы в суспензии — 14 %.

При соблюдении данных условий влажность твердого остатка после центрифугирования составит 81,8 %. Для получения твердого остатка с влажностью 80 % при скорости центрифугирования 3000 об/мин, температуре суспензии 25 °С, содержании твердой фазы в суспензии 14 % продолжительность центрифугирования должна составить 44,5 мин, а при скорости центрифугирования 2750 об/мин — 48,3 мин. Качественный состав твердого остатка, полученного после центрифугирования, не зависит от режимов процесса.

Выведенные обобщенные уравнения представляют собой математические модели процесса центрифугирования и позволяют:

- исключить необходимость проведения повторных исследований при изменении хотя бы од-

ного из рассмотренных факторов в изученном или расширенном диапазонах;

- учитывать физический смысл процесса центрифугирования в частных зависимостях;

- адекватно прогнозировать процесс центрифугирования текущих отходов за пределами варьируемых уровней изученных факторов;

- прогнозировать изменение рассмотренных параметров отклика (pH, содержание сухого остатка фугата, влажность твердой фазы, содержания Ti, V, Zr, Nb, Ca, Mg, Zn, Fe, Cu, Cr, Mn, Al, Na, K, Li в твердом остатке) при изменении факторов.

При скорости вращения ротора центрифуги 2500—3000 об/мин в течение 15—60 мин был получен прозрачный фугат, содержащий 160—200 мг/дм³ взвешенных веществ. Общее содержание мине-



Рис. 3. Внешний вид твердого остатка, полученного после центрифугирования промышленных стоков титаномагниевого производства

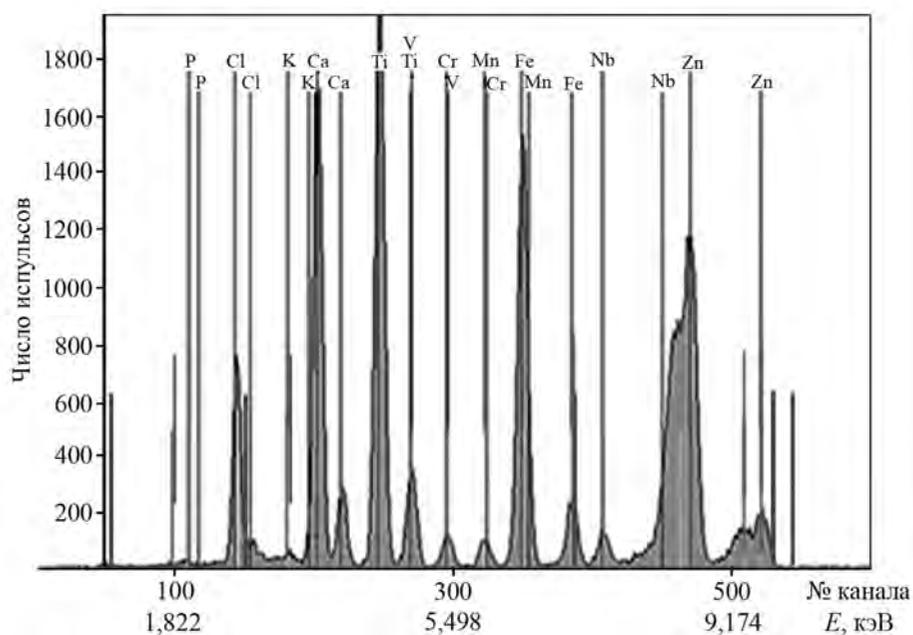
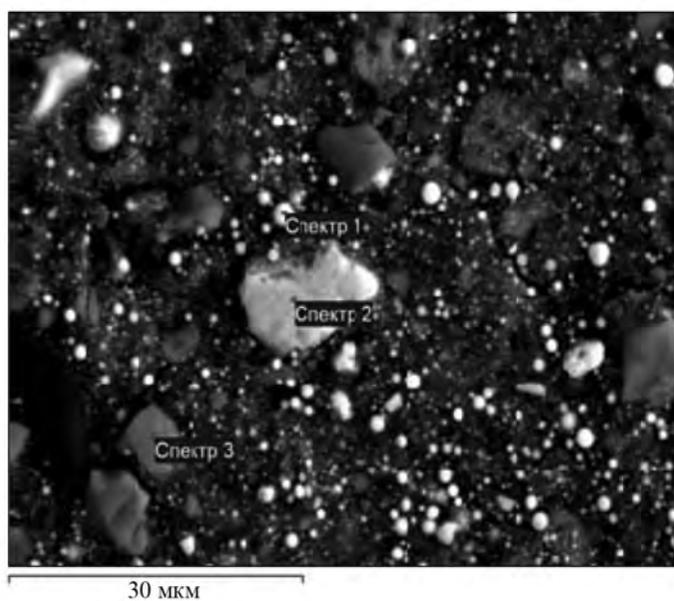


Рис. 4. Результаты качественного анализа образца твердой части промышленных стоков (остаток I)



Элемент, мас.%	Спектр 1	Спектр 2	Спектр 3
O	57,17	52,69	40,86
Mg	0,89	0,9	0,41
Al	2,33	2,19	0,94
Si	5,15	5,67	36,16
S	0,58	0,56	0,73
Cl	0,6	0,57	0,52
K	0,22	0,33	—
Ca	14,25	13,2	7,74
Ti	9,77	11,64	6,72
Cr	0,4	0,38	—
Mn	1,24	1,48	0,6
Fe	6,58	9,1	4,71
Zn	0,81	1,3	0,6
Итого	100	100	100

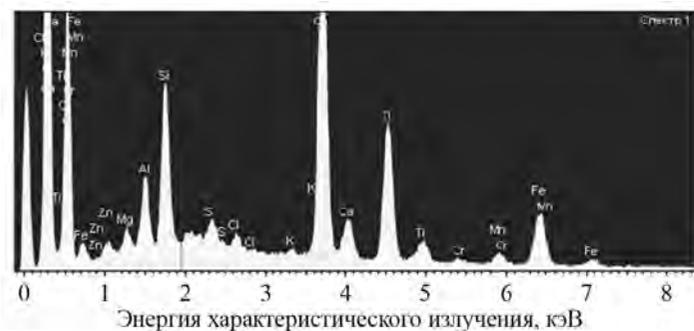


Рис. 5. Результаты анализа твердой части промышленных стоков (остаток I) на растровом электронном микроскопе

ральных и частично органических соединений (сухой остаток) составило 38000—40500 мг/дм³.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой минерализации фугата и необходимости его дальнейшей очистки.

Во всех случаях образовывались плотные пластилинообразные осадки темно-коричневого цвета, внешний вид которых представлен на рис. 3.

Полученные результаты исследований (см. рис. 4, 5) свидетельствуют о присутствии в твердом остатке, полученном после центрифугирования, следующих фаз: SiO₂, TiO₂, FeO, Ti₃O, VO₉, ZnCl₂, FeCl₂, ZnAl₂O₄, ZnFe₂O₄, Fe₂(SiO₄), CaCl₂, FeCl₃.

Химический фазовый анализ остатка I показал, что в нем содержится кремнезем (свободный — 2,29 %, связанный — 5,23 %), кальций (в виде хлорида — 8,17 %, карбоната — 12,14 %, сульфата, связанного с алюмосиликатом, — 2,6 %), оксид титана (IV) (в виде рутила — 2,75 %, ильменита — 2,83 %), железо (трехвалентное — 3,2 %, двухвалентное — менее 0,1 %), сера (сульфатная — 1,44 %).

Исследованиями по деминерализации фугатов, полученных после центрифугирования промышленных стоков титаномагниевого производства, методом термического обессоливания с использованием роторного вакуумного испарителя были выявлены оптимальные параметры процесса: $P < 50$ мбар, $t = 70$ °С, $\tau = 30$ мин.

В табл. 4 представлены результаты экспериментов по деминерализации фугатов с использованием роторного вакуумного испарителя при оптимальных условиях.

Конденсат, полученный при вакуумной возгонке фугатов, соответствовал техническим условиям «Вода промышленная оборотного водоснабжения» [3], мг/дм³: хлориды — не более 500 (в конденсате 50); сухой остаток — не более 2000

Таблица 4
Химический состав конденсата, полученного при вакуумной возгонке растворов (фугатов) после центрифугирования промстоков титаномагниевого производства ($P < 50$ мбар, $t = 70$ °С, $\tau = 30$ мин)

Компоненты	Содержание, мг/дм ³	
	в конденсате	в фугате
Ионы титана	0,010	0,410
Ионы кальция	0,041	263,2
Ионы железа (об.)	0,014	8,1
Ионы магния	0,013	814,7
Ионы натрия	0,083	430,5
Ионы калия	0,020	1498,4
Ионы алюминия	0,031	2,78
Хлориды	50	25600
Сухой остаток	100	39750
pH	6,95	6,5
Взвешенные вещества	—	195



Рис. 6. Внешний вид остатка, полученного при вакуумной возгонке фугата ($P < 50$ мбар, $t = 70$ °С, $\tau = 30$ мин)

Таблица 5
Материальный баланс процесса вакуумной возгонки фугатов (растворов), полученных после центрифугирования промышленных стоков титаномагниевого производства

Поступило			Получено		
Наименование	Количество		Наименование	Количество	
	г	%		г	%
Фугат	5000	100	Конденсат	4700	94,00
			Остаток II	296	5,92
			Невязка	4	0,08
Итого	5000	100	Итого	5000	100

(в конденсате 100); взвешенные вещества — не более 50 (в конденсате — н/о).

Остаток после вакуумной возгонки, внешний вид которого представлен на рис. 6, содержал в основном хлориды щелочных и щелочно-земельных металлов, мас. %: 80—82 CaCl₂, 10—11 MgCl₂, 5—6 NaCl, 4—5 KCl. Он может быть использован для приготовления буровых растворов.

Проведенные укрупненно-лабораторные испытания деминерализации фугата на вакуумном роторном испарителе показали, что выход остатка II составил ~6 % (см. табл. 5).

Заключение

В данной работе впервые исследован способ утилизации промышленных стоков титаномагниевого производства, включающий предварительное разделение стоков на центрифуге и последующее вакуумное испарение полученных фугатов.

Применение центрифугирования для разделения промышленных стоков позволяет уменьшить содержание в них взвешенных веществ в 3—4 раза. Полученные фугаты содержали, мг/дм³: 195 — взвешенные вещества, 26500 — хлориды, 39750 — сухой остаток. Это свидетельствует о высокой минерализации фугата и необходимости его дальнейшей очистки.

В лабораторных условиях показана целесообразность применения термического метода деминерализации промстоков титаномагниевого производства с использованием роторного вакуумного испарителя. Определены оптимальные параметры процесса: температура — 70 °С, остаточное давление — менее 50 мбар, продолжительность — 30 мин. В конденсате, полученном при вакуумной возгонке фугатов, не обнаружено взвешенных веществ, содержание хлоридов составило 50 мг/дм³. Предлагаемая технология утилизации промышленных стоков титаномагниевого производства будет способствовать созданию замкнутого цикла водоснабжения на предприятии. Остаток после вакуумной возгонки фугата содержал в основном хлориды щелочных и щелочно-земельных металлов, мас. %: 80—82 CaCl₂; 10—11 MgCl₂; 5—6 NaCl; 4—5 KCl. Выход остатка составил ~6 % от массы фугата. Проведенные исследования показали возможность получения промпродуктов, которые можно использовать в качестве добавки для приготовления противогололедных материалов, а

также буровых растворов и растворов для глушения скважин.

Литература/References

1. *Абрамов Д.С., Сандлер Р.А., Александровский С.В., Снежко Е.И., Кудрявский Ю.П., Бондарев С.Н., Голубев А.А., Гулякин А.И., Рудницкий М.Л., Скородумов В.А., Годун И.В., Вяткин И.П., Евсеев Н.К., Семянников Г.Г.* Способ переработки хлоридных отходов титанового производства: Пат. 959432 (РФ). 2000. *Abramov D.S., Sandler R.A., Aleksandrovskii S.V., Snezhko E.I., Kudryavskii Yu.P., Bondarev S.N., Golubev A.A., Gulyakin A.I., Rudnitskii M.L., Skorodumov V.A., Godun I.V., Vyatkin I.P., Evseev N.K., Semyannikov G.G.* A method of processing of chloride wastes of titanium production: Pat. 959432 (RF). 2000 (In Russ.).
2. *Кирьянов С.В., Сизиков И.А., Рзынkin С.А., Тетерин В.В., Бездоля И.Н.* Способ очистки сточных вод титаномагниевого производства: Заявка на изобретение 2006134806 (РФ). 2008. *Kir'yanov S.V., Sizikov I.A., Rzyankin S.A., Teterin V.V., Bezdolya I.N.* A method of sewage treatment of titanium-magnesium production: Application for invention 2006134806 (RF). 2008 (In Russ.).
3. *Ширинкина Е.С.* Ресурсосберегающая технология обезвреживания сточных вод титаномагниевого производства: Дис. ... канд. техн. наук. Пермь: Пермский гос. ун-т, 2009. *Shirinkina E.S.* Resource-saving technology of waste water decontamination of titanium-magnesium production: Dissertation of PhD. Perm': Perm' State University, 2009 (In Russ.).
4. Экологический кодекс Республики Казахстан от 9 января 2007 No. 212 (обновленный с изменениями на 01.01. 2018). *Ecological Code of the Republic of Kazakhstan dated January 9, 2007, No. 212 (updated with changes as of 01.01. 2018) (In Russ.).*
5. *Wijmans J.G., Baker R.W.* The solution-diffusion model: A review. *J. Membr. Sci.* 1995. Vol. 107 (1—2). P. 1—21.
6. *Hillis P.* Membrane technology in water and wastewater treatment. Great Britain: Royal Society of Chemistry, 2000.
7. *Hussein Abdel-Shafy.* Membrane technology for water and wastewater management and application in Egypt. *Egypt. J. Chem.* 2017. Vol. 60 (3). P. 347—360.
8. *Brunetti A., Macedonio F., Barbier G., Drioli E.* Membrane engineering for environmental protection and sustainable

- industrial growth: Options for water and gas treatment. *Sci. Centr. J. Environ. Eng. Res.* 2015. Vol. 20 (4). P. 307–328.
9. Dalwania M., Benes N., Bargeman G., Stamatialis D., Wessling M. Effect of pH on the performance of polyamide/polyacrylonitrile based thin film composite membranes. *J. Membr. Sci.* 2011. Vol. 372. P. 228–238.
 10. Nunes S., Peinemann K. Membrane technology in the chemical industry. Weinheim: Wiley VCH, 2001.
 11. Lan Ying Jiang. Membrane-based separations in metallurgy: Principles and applicat. Elsevier Science, 2017.
 12. Ngoc Lieu Le, Suzana P. Nunes. Materials and membrane technologies for water and energy sustainability. *J. Sustainable Mater. Technol.* 2016. Vol. 7. P. 1–28.
 13. Дорофеева Л.И. Разделение и очистка веществ мембранными, обменными и электрохимическими методами. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2008.
Dorofeeva L.I. Separation and purification of substances by membrane, exchange and electrochemical methods. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo Politekhnikheskogo Universiteta, 2008 (In Russ.).
 14. Grimm J., Bessarabov D., Sanderson R. Review of electro-assisted methods for water purification. *J. Desalination.* 1988. Vol. 115. P. 285–294.
 15. Cadotte J.E. Evolution of composite reverse osmosis membranes. In: *Materials science of synthetic membranes.* Washington DC: American Chemical Society, 1985. Vol. 269. P. 273–294.
 16. Malaeb L., Ayoub G. Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review. *J. Desalination.* 2011. Vol. 267. P. 1–8.
 17. Ильин В.И. Разработка технологических решений по очистке промышленных сточных вод до предельно допустимых концентраций. *Экология пром. пр-ва.* 2011. No. 1. С. 66–68.
 18. Илин В.И. Development of technological solutions for purification of industrial wastewater to the maximum allowable concentrations. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva.* 2011. No. 1. P. 66–68 (In Russ.).
 19. Методические указания по отбору проб для анализа сточных вод ПНД Ф 12.15.1-08 (утв. Федеральным центром анализа и оценки техногенного воздействия 18.04.2008).
Methodological instructions for sampling for the analysis of sewage water PND F 12.15.1-08 (approved by the Federal Centre for analysis and assessment of technogenic impact on April 18, 2008) (In Russ.).
 19. рН ФР.1.31.2007.03794. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений в водах потенциометрическим методом.
рН FR.1.31.2007.03794. Quantitative chemical analysis of water. The procedure for performing measurements in water by a potentiometric method (In Russ.).
 20. ГОСТ 26449.1-85. Сухой остаток. Установки дистилляционные опреснительные стационарные. Методы химического анализа соленых вод.
State standard 26449.1-85. The dry residue. Stationary distillation desalination plants. Methods for the chemical analysis of saline water (In Russ.).
 21. СТ РК 1015-2000. Сульфаты. Вода. Гравиметрический метод определения сульфатов в природных, сточных водах.
RK standard 1015-2000. Sulphates. Water. A graphical method for the determination of sulfates in natural wastewater (In Russ.).
 22. СТ РК 1496-2006. Хлорид-ионы. Вода сточная. Определение массовой концентрации хлоридов аргентометрическим методом.
RK standard 1496-2006. Chloride ions. Sewage water. Determination of the mass concentration of chlorides by the argentometric method (In Russ.).