

ISSN 1561-8331 (Print)  
ISSN 2524-2342 (Online)  
УДК 631.833.2  
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-4-483-489>

Поступила в редакцию 19.02.2019  
Received 19.02.2019

**З. А. Готто, И. И. Гончарик, А. Л. Навныко, Е. О. Осипова**

*Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

### ПОЛУЧЕНИЕ СУЛЬФАТА КАЛИЯ КОНВЕРСИЕЙ ФОСФОГИПСА КАРБОНАТОМ КАЛИЯ

**Аннотация.** Представлена возможность получения сульфата калия путем конверсии фосфогипса и карботана калия по реакции  $\text{CaSO}_4 + \text{K}_2\text{CO}_3 \rightarrow \downarrow \text{CaCO}_3 + \text{K}_2\text{SO}_4$ . Определены оптимальные условия данного процесса. Показано, что в водной среде при температуре 20 °С, стехиометрическом соотношении исходных компонентов, скорости вращения мешалки 200 об/мин в течение 15–30 мин степень использования ионов  $\text{Ca}^{2+}$  составляет 94–95 %. Сульфат калия, содержащийся в жидкой фазе, путем выпаривания и последующей кристаллизацией выделяется в твердую фазу.

**Ключевые слова:** фосфогипс, карбонат калия, сульфат калия, конверсия, выпарка, фильтрация

**Для цитирования.** Получение сульфата калия конверсией фосфогипса карбонатом калия / З. А. Готто [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2019. – Т. 55, № 4. – С. 483–489. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-4-483-489>

**Z. A. Hotto, I. I. Hancharyk, A. L. Navnyko, E. O. Osipova**

*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

### PRODUCTION OF POTASSIUM SULPHATE BY CONVERSION OF PHOSPHOGYPSUM AND POTASSIUM CARBONATE

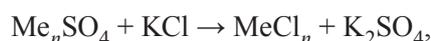
**Abstract.** This work shows the possibility of obtaining potassium sulfate by converting phosphogypsum and potassium carbonate by the reaction  $\text{CaSO}_4 + \text{K}_2\text{CO}_3 \rightarrow \downarrow \text{CaCO}_3 + \text{K}_2\text{SO}_4$ . The optimal conditions for this process are determined. It is shown that in an aqueous medium at a temperature of 20 °C, a stoichiometric ratio of the initial components, the rotation speed of the stirrer 200 rpm for 15–30 min, the degree of use of  $\text{Ca}^{2+}$  ions is 94–95 %. Potassium sulfate contained in the liquid phase is transferred into the solid phase by evaporation and subsequent crystallization.

**Keywords:** phosphogypsum, potassium carbonate, potassium sulfate, conversion, evaporation, filtration

**For citation.** Hotto Z. A., Hancharyk I. I., Navnyko A. L., Osipova E. O. Production of potassium sulphate by conversion of phosphogypsum and potassium carbonate. *Vestsi Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk=Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 483–489 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-4-483-489>

**Введение.** Наиболее распространенным калийным удобрением является хлорид калия. Однако систематическое использование его в сельском хозяйстве отрицательно влияет на сельскохозяйственные культуры, особенно плодово-ягодные, цитрусовые. Применение под эти культуры бесхлорных калийных удобрений в виде сульфата калия способствует не только повышению урожайности, но и улучшению их качества: повышается содержание крахмала в картофеле, сахаристости в сахарной свекле, вкусовых качеств винограда.

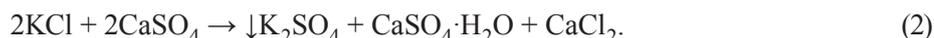
В настоящее время крупных производителей этих удобрений в странах СНГ нет, что обусловлено отсутствием разрабатываемой сырьевой базы для получения сульфатных калийных удобрений. В основном для получения сульфата калия используют конверсионные методы [1], основанные на взаимодействии сульфатных солей с хлоридом калия по реакции:



где Me – это ионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  и др. Из всех известных ионов наибольший интерес представляют ионы  $\text{Ca}^{2+}$ , входящие в состав распространенного минерала – гипса, являющегося отходом при производстве фосфорной кислоты, объем которого достигает десятков миллионов тонн. Длительное время проблеме утилизации фосфогипса не уделялось должного внимания, что привело к образованию огромных запасов лежалого фосфогипса, для хранения которого не-

обходимы большие площади земель [2]. Поэтому использование отходного фосфогипса для получения бесхлорных калийных удобрений не вызывает сомнений.

Как известно, проведение конверсии фосфогипса и хлорида калия в водной среде невозможно. Однако введение в данную систему ряда органических (спирты, кетоны) или азотсодержащих (моно-, ди-, триэтанолламины, мочевины, аммиак и др.) соединений увеличивает, с одной стороны, растворимость  $\text{CaSO}_4$ , а с другой, – уменьшает растворимость  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , что создаст благоприятные условия для конверсии между  $\text{CaSO}_4$  и  $\text{KCl}$ . В результате возможно получение как сингени-та, так и арканита по следующим реакциям:



Так, в работе [3] приведены результаты получения сульфата калия в присутствии триэтанол-амина (ТЭА) по реакции (2). Определены оптимальные условия проведения данной реакции: температура – 20 °С, время перемешивания – 3 ч, 160 %-ный избыток  $\text{KCl}$  от стехиометрии и 60 %-ный раствор ТЭА. Выход  $\text{K}_2\text{SO}_4$  составляет 90–91 % при содержании его в твердой фазе 92–93 %. Данный способ имеет ряд недостатков, преодоление которых в промышленных масштабах вызывает сомнения из-за трудностей, возникающих при регенерации ТЭА, плохой филь-труемости полученного осадка, вызванной высокой вязкостью ТЭА, длительностью конверсии и высоким избытком  $\text{KCl}$  от стехиометрии.

Большой интерес представляет способ получения  $\text{K}_2\text{SO}_4$  путем взаимодействия фосфогипса с карбонатом калия, предложенный в работе [4]. Данный процесс осуществляется по уравнению (3) в водной среде, что очень важно, так как реакция происходит без органического растворителя:



В этом случае в твердую фазу выпадает  $\text{CaCO}_3$ , а  $\text{K}_2\text{SO}_4$  остается в растворе, который под-вергается выпарке, сопровождающейся кристаллизацией из него  $\text{K}_2\text{SO}_4$ . Данный способ состоит из двух стадий: первая – основная конверсия фосфогипса и карбоната калия; вторая – выпарка фильтрата с целью получения сульфата калия. Технологическая схема процесса представлена на рис. 1.

Цель настоящей работы – разработка оптимальных условий конверсии фосфогипса и кар-боната калия в водной среде и получение высококонцентрированного сульфата калия.

**Экспериментальная часть.** Для исследований использовали фосфогипс (отход при произ-водстве фосфорной кислоты) следующего состава в пересчете на сухое вещество (мас.%):  $\text{CaO}$  – 39,6;  $\text{SO}_3$  – 58,9;  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0,6;  $\text{F}_2$  – 0,5;  $\text{SiO}_2$  – 0,2; влажность – 32–38. Имеющимися примесями пре-небрегали. Перед осуществлением конверсии фосфогипс предварительно высушивали на возду-хе до влажности 19–22 % и измельчали до однородной массы.

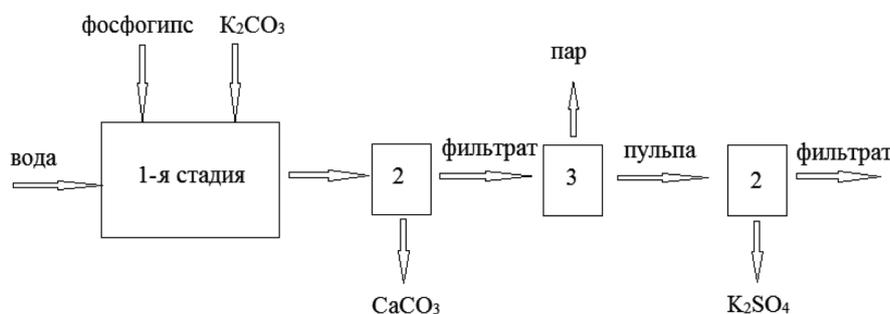


Рис. 1. Технологическая схема конверсии фосфогипса и карбоната калия в водной среде:  
1-я стадия – конверсия фосфогипса и  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ; 2 – фильтры; 3 – выпарной аппарат

Fig. 1. Technological scheme for the conversion of phosphogypsum and potassium carbonate in an aqueous medium:  
1st stage – the conversion of phosphogypsum and  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ; 2 – filters; 3 – evaporator

Исследования проводили следующим образом. К фосфогипсу добавляли  $K_2CO_3$  в стехиометрическом соотношении, согласно реакции (3), и такое количество дистиллированной воды, чтобы при проведении конверсии содержание  $K_2SO_4$  в растворе не достигало насыщения, а составляло около 8 %. После интенсивного перемешивания на механической мешалке суспензию фильтровали, а затем исследовали составы твердой и жидкой фаз на ионы  $SO_4^{2-}$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  по известным методикам. Ионы  $SO_4^{2-}$  определяли гравиметрическим методом,  $K^+$  – пламенно-фотометрическим,  $Ca^{2+}$  – комплексометрическим титрованием трилоном Б,  $CO_3^{2-}$  – по разности суммы г-экв катионов и анионов. Составы твердой фазы контролировали рентгенофазовым анализом. О выходе реакции судили по степени использования иона кальция ( $E$ ), которую рассчитывали по формуле:

$$E = \frac{\alpha(Ca)}{\alpha'(Ca)} \times 100,$$

где  $\alpha(Ca)$  – содержание ионов  $Ca^{2+}$  в продукте после конверсии;  $\alpha'(Ca)$  – содержание ионов  $Ca^{2+}$  в фосфогипсе, взятом на конверсию.

На процесс конверсии влияет ряд факторов: время и скорость перемешивания, крупность частиц фосфогипса, температура, норма расхода  $K_2CO_3$  от стехиометрии. С целью выбора оптимальных условий ведения данного процесса изучали влияние указанных технологических параметров на получение продуктов высокого качества и большей степенью конверсии. Повышение температуры и увеличение нормы расхода карбоната калия не оказали существенного влияния на степень использования ионов  $Ca^{2+}$ , поэтому все последующие исследования проводили при 20 °С и стехиометрической норме расхода.

В первой серии опытов было исследовано влияние времени перемешивания на разложение исследуемых солей. Опыты проводили используя фосфогипс фракции – 0,25 мм, режим перемешивания 200 об/мин, температур 20 °С. Было установлено (табл. 1), что этот процесс протекает с большой скоростью и уже за 5 мин перемешивания степень использования ионов  $Ca^{2+}$  составляет 86,31 %. При перемешивании в течение 10–15 мин скорость реакции еще повышается и достигает максимальной величины 94,15 % при 15–20 мин. При дальнейшем увеличении времени перемешивания реакция замедляется и повышения степени использования ионов  $Ca^{2+}$  практически не наблюдается.

Т а б л и ц а 1. Качественно-количественные показатели конверсии фосфогипса и карбоната калия фракции фосфогипса –0,25 мм, режиме перемешивания 200 об/мин, температуре 20 °С

Table 1. Qualitative and quantitative indicators of the conversion of phosphogypsum and potassium carbonate with a phosphogypsum fraction of –0,25 mm, a stirring mode of 200 rpm and a temperature of 20 °С

Время перемешивания, мин	Фаза	Ионный состав, мас.%				Солевой состав, мас.%				E, мас.%
		$K^+$	$Ca^{2+}$	$SO_4^{2-}$	$CO_3^{2-}$	$CaSO_4$	$K_2SO_4$	$CaCO_3$	$K_2CO_3$	
5	ф-г	3,52	0,005	3,92	0,26	0,01	7,25	–	0,43	86,31
	тв. фаза	2,95	34,41	11,29	46,73	16	–	74,18	5,21	
10	ф-г	3,69	0,005	4,04	0,31	0,02	7,32	–	0,72	92,06
	тв. фаза	1,72	36,71	7,73	51,46	10,96	–	84,39	3,04	
15	ф-г	3,62	0,006	4,01	0,28	0,02	7,25	–	0,65	94,15
	тв. фаза	1,57	35,57	7,42	49,84	7,42	–	81,84	2,78	
30	ф-г	3,56	0,006	4,13	0,16	0,03	7,46	–	0,36	94,19
	тв. фаза	1,39	36,19	5,29	54,2	7,48	–	89,4	2,46	

При изучении влияния крупности частиц фосфогипса надо учитывать, что чем мельче частицы, тем полнее и быстрее протекает реакция. Крупность зерен фосфогипса, полученного в промышленных условиях, составляет 0,17 мм. Однако этот продукт имеет склонность к комкованию и слежалости, а так как в основном будет использоваться фосфогипс из отвалохранилищ, то, естественно, крупность зерен будет значительно больше.

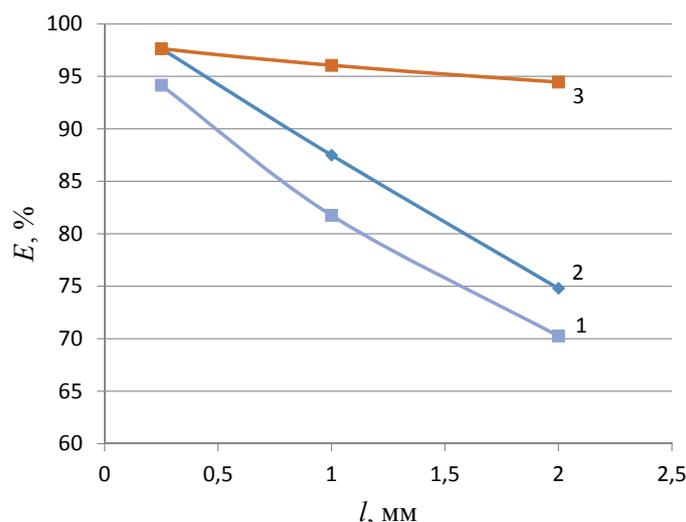


Рис. 2. Зависимость степени использования ионов  $\text{Ca}^{2+}$  ( $E$ ) от различной крупности частиц ( $l$ ) фосфогипса и времени перемешивания: 1 – 15 мин; 2 – 1 ч; 3 – 3 ч

Fig. 2. Dependence of the degree of use of  $\text{Ca}^{2+}$  ( $E$ ) ions on various particle sizes ( $l$ ) of phosphogypsum and mixing time: 1 – 15 min; 2 – 1 h; 3 – 3 h

Для исследований использовали следующие фракции:  $-0,25$  мм,  $-1,0$  мм и  $-2,0$  мм. Зависимость степени использования ионов  $\text{Ca}^{2+}$  от крупности используемых частиц фосфогипса при различном времени перемешивания (15 мин, 1 ч, 3 ч) представлена на рис. 2. Показано, что на разложение влияет не только крупность частиц, но и время перемешивания. Особенно ярко это выражено при времени перемешивания, равном 15 мин (рис. 2, кривая 1). Так, если для фракции  $-0,25$  мм практически максимальная степень использования ионов  $\text{Ca}^{2+}$  достигает 94,15 % в течение 15 мин, то для частиц фракции  $-1,0$  и  $-2,0$  мм этот показатель при том же времени перемешивания достигает только 81,76 и 70,26 % соответственно. С увеличением времени перемешивания до 1 ч степень использования ионов  $\text{Ca}^{2+}$  для частиц исследуемых крупностей повышается до 97,64, 87,5 и 74,81 % соответственно. А при трехчасовом взаимодействии этот показатель от крупности частиц фосфогипса изменяется незначительно и составляет 97,64, 96,05 и 94,46 % соответственно.

Изучали влияние скорости перемешивания (об/мин) на показатели конверсии фосфогипса и карбоната калия. Полученные данные представлены в табл. 2. Установлено, что для мелкой фракции  $-0,25$  мм скорость вращения мешалки практически не влияет на степень использования ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и составляет около 94 % при всех исследуемых скоростях вращения мешалки от 200 до 600 об/мин. Для крупной фракции фосфогипса, равной  $-2$  мм, повышение скорости вращения приводит к незначительному увеличению степени использования ионов  $\text{Ca}^{2+}$  (на 1,5–2,5 %), тогда как изменение времени перемешивания при постоянной скорости вращения на 30 %. Таким образом, скорость реакции конверсии фосфогипса и  $\text{K}_2\text{CO}_3$  увеличивается с повышением времени перемешивания и практически не зависит от скорости перемешивания.

Первым существенным преимуществом данного метода является проведение реакции в водной среде, вторым немаловажным фактором – скорость фильтрации полученных осадков. Необходимо учесть, что скорость фильтрации определяется структурой осадка, которая зависит в том числе и от состава жидкой фазы. Ранее [3] было установлено, что осадок, полученный при конверсии фосфогипса и хлорида калия в присутствии ТЭА, фильтровался с небольшой скоростью. Однако при конверсии фосфогипса с  $\text{K}_2\text{CO}_3$  полученный осадок имел высокую скорость фильтрации. Поэтому проведены исследования, характеризующие скорость осветления суспензий, которые коррелируют с данными по фильтрации. Полученные результаты представлены на рис. 3. Откуда видно, что осветление суспензии, полученной при конверсии фосфогипса и  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , происходит значительно быстрее (рис. 3, кривая 1), чем суспензии, полученной при конверсии фосфогипса

и KCl в присутствии ТЭА (рис. 3, кривая 2). В первом случае уплотнение осадка закончилось в течение 5 мин, тогда как во втором – даже в течение получаса степень осветления пульпы составила только 5 %. Следует отметить, что количество фосфогипса в обоих случаях было одинаковым. По-видимому, присутствие ТЭА значительно сгущает суспензию, что является отрицательным фактором при фильтрации осадка. По этой причине фильтрация суспензий, полученных на основе  $K_2CO_3$  и фосфогипса, осуществлялась значительно быстрее, чем полученных на основе KCl и фосфогипса, что подтверждает превосходство данного способа переработки фосфогипса на  $K_2SO_4$  над описанным ранее [3].

Таблица 2. Влияние времени перемешивания и скорости вращения мешалки на степень использования ионов  $Ca^{2+}$  при различных фракциях фосфогипса

Table 2. The effect of stirring time and the rotation speed of the mixer on the degree of use of  $Ca^{2+}$  ions in different phosphogypsum fractions

Фракция, мм	Время перемешивания, мин	E, мас.% при различных скоростях вращения, об/мин		
		200	400	600
0,25	10	90,06	91,64	91,65
	15	93,15	94,2	94,7
	180	93,64	96,89	97,73
2	15	62,26	64,61	65,69
	180	94,46	95,56	96,08

Получение  $K_2SO_4$  – вторая стадия процесса. Суспензия, полученная на первой стадии, подвергалась фильтрации, в результате чего был получен осадок, содержащий около 90 %  $CaCO_3$  и фильтрат, содержащий 7,5–8 %  $K_2SO_4$ . Выделение  $K_2SO_4$  из фильтрата было осуществлено удалением из него воды методом выпаривания. Установлено, что при выпаривании 18,3 % воды от исходной массы раствор мутнеет, что связано с образованием труднорастворимых солей кальция, которые были удалены горячим фильтрованием. Очищенный раствор подвергали повторному упариванию воды до 70 % и охлаждению, в результате в твердую фазу выкристаллизовался продукт, содержащий 99,5 %  $K_2SO_4$ . Полученные данные представлены в табл. 3.

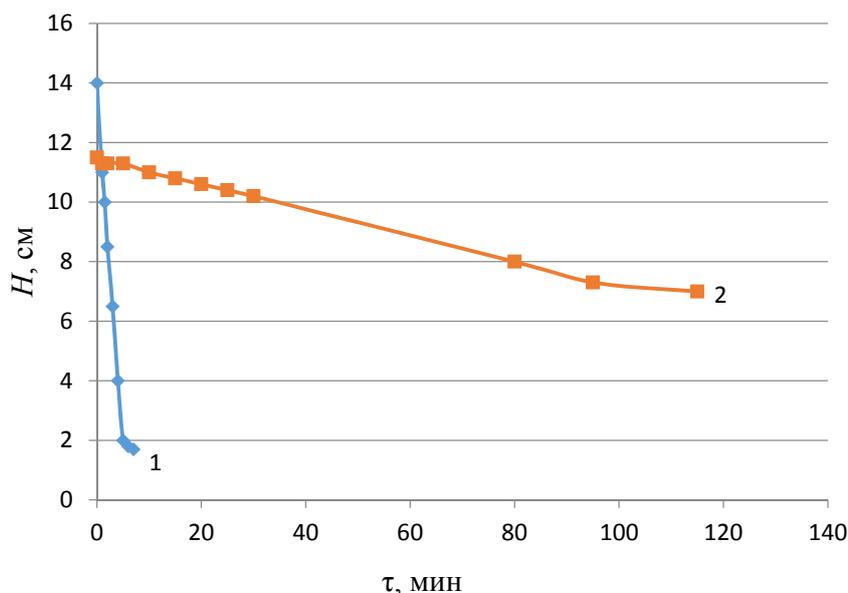


Рис. 3. Зависимость высоты осадка ( $H$ ) от времени ( $\tau$ ) полученной суспензии при конверсии фосфогипса: 1 –  $K_2CO_3$  в водной среде; 2 – KCl в присутствии ТЭА

Fig. 3. Dependence of sediment height ( $H$ ) on time ( $\tau$ ) obtained suspension in the conversion of phosphogypsum: 1 –  $K_2CO_3$  in an aqueous medium; 2 – KCl in the presence of TEA

В случае полного удаления воды (опыт 2) без отделения труднорастворимых кальциевых соединений полученный осадок содержит только 94,9 %  $K_2SO_4$  или 50,99 %  $K_2O$ , что вполне удовлетворяет требованиям сельского хозяйства.

Т а б л и ц а 3. Составы щелоков и осадков, полученных при выпарке фильтратов после конверсии фосфогипса и  $K_2CO_3$

Table 3. Composition of liquors and sediments obtained by evaporation of filtrates after the conversion of phosphogypsum and  $K_2CO_3$

Степень выпарки	Фаза	Количество выпаренной воды, %	Ионный состав, мас.%				Солевой состав, мас.%			
			$K^+$	$Ca^{2+}$	$SO_4^{2-}$	$CO_3^{2-}$	$CaSO_4$	$K_2SO_4$	$K_2CO_3$	$H_2O$
1	Исходный раствор	18,3	3,59	0,02	4,2	0,15	0,05	7,56	0,35	92,04
	Горячий раствор		4,39	0,01	5,15	0,16	0,01	9,32	0,38	90,29
2	Охлажденный раствор	69,3	5,05	0,01	5,14	0,68	0,04	9,28	1,57	89,12
	Осадок		44,82	0,03	55,13	0	0,09	99,89	–	0,02
1	Исходный раствор	100	3,78	0,02	4,45	0,14	0,05	8,01	0,33	91,61
	Осадок		44,8	0,18	52,76	1,69	0,61	94,93	3,89	0,57

**Заключение.** Установлена возможность получения сульфата калия путем конверсии фосфогипса и карбоната калия в водной среде при температуре 20 °С, стехиометрической норме исследуемых солей, скорости вращения мешалки 200 об/мин в течение 15–30 мин. Полученная суспензия подвергается фильтрации, в результате чего выделяется осадок, содержащий 91–92 %  $CaCO_3$  и фильтрата – 8 %  $K_2SO_4$ . При упаривании полученного раствора кристаллизуется соль, содержащая 95–98 %  $K_2SO_4$ .

#### Список использованных источников

1. Букша, Ю. В. Конверсионные способы получения сульфата калия / Ю. В. Букша, Г. В. Оспова, Ю. С. Сафрыгин // Горный журнал. – 2007. – № 8. – С. 83–85.
2. Ющенко, И. С. Характеристика насыпного грунта (фосфогипс) / И. С. Ющенко // Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий: сб. ст. V Всерос. молодеж. геологич. конф. – Уфа, 2017. – С. 99–102.
3. Получение сульфата калия взаимодействием хлорида калия и сульфата кальция / И. И. Гончарик [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2017. – № 3. – С. 98–103.
4. Спосіб переробки фосфогіпсу в комплексне добриво з використанням напівпродукту виробництва екстракційної фосфатної кислоти: пат. 93253 UA: МПК C01B 25/32; C05B 3/00 / Г. В. Кримець, А. І. Молюга, О. С. Федоров, І. М. Астрелін; дата публ.: 25.09.2014.

#### References

1. Buksha Y. V., Osipova G. V., Safrygin Y. S. Conversion methods for producing potassium sulfate. *Gornyi Zhurnal*, 2007, no. 8, pp. 83–85 (in Russian).
2. Yushchenko I. S. Characteristics of bulk soil (phosphogypsum). *Geologiya, geoekologiya i resursnyi potentsial Urala i sopredel'nykh territorii: sbornik statei V Vserossiiskoi molodezhnoi geologicheskoi konferentsii* [Geology, geo-ecology and resource potential of the Urals and adjacent territories. collection of articles of the V All-Russian youth geological conference]. Ufa, 2017, pp. 99–102 (in Russian).
3. Goncharik I. I., Shevchuk V. V., Kudina O. A. (eds.) Preparation of potassium sulfate in a reaction of potassium chloride and calcium sulfate. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2017, no 3, pp. 98–103 (in Russian).
4. Krymets H. V., Moluga A. I., Fedorov O. S., Astrelin I. M. *Method of processing of phosphogypsum in complex fertilizer using semi-finished product of extraction of phosphoric acid*. Patent Ukraine no. 93253, 2014 (in Ukraine).

### Информация об авторах

*Готто Земфира Акифовна* – науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zima.gotto@bk.ru

*Гончарик Инна Иосифовна* – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: igiclpns@rambler.ru

*Навныко Анна Леонидовна* – мл. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: anna.navnyko.86@mail.ru

*Осипова Елена Олеговна* – науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: osipovaelena@gmail.ru

### Information about the authors

*Zemfira A. Gotto* – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry. National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zima.gotto@bk.ru

*Ina I. Hancharyk* – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: igiclpns@rambler.ru

*Anna L. Navnyko* – Junior Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: anna.navnyko.86@mail.ru

*Elena O. Osipova* – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: osipovaelena@gmail.ru