

УДК 691.3:666.97

**О. Е. Хотянович<sup>1</sup>, И. А. Белов<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup>ГП «Институт НИИСМ»**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЫЛИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ  
КРЕМНЕФТОРИДА ЦИНКА**

В работе исследуется процесс получения кремнефторида цинка из отечественного техногенного сырья. Установлены закономерности синтеза, обеспечивающие максимальный выход кристаллического кремнефторида цинка. Оптимальными параметрами технологического процесса являются: концентрация кремнефтористоводородной кислоты – 18–22 мас. %; избыток кремнефтористоводородной кислоты против стехиометрического количества – 3–5 мас. %; температура синтеза – 70–80°C; температура выпаривания – 60–80°C. Согласно данным рентгенофазового и химического анализов, полученный продукт содержит 87–91%  $ZnSiF_6 \cdot 6H_2O$  и 8–12%  $CaSiF_6 \cdot 2H_2O$ . Разработанный технологический режим получения кремнефторида цинка позволяет производить продукт, по качеству не уступающий известным отечественным («Сифтом») и импортным («Burke-0-Lith») аналогам.

**Ключевые слова:** кремнефтористоводородная кислота, пыль газоочистки металлургического завода, синтез, кремнефторид цинка.

**О. Е. Khotyanovich<sup>1</sup>, I. A. Belov<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Belarusian State Technological University<sup>2</sup>SE “NIISM Institute”**INVESTIGATION OF THE METALLURGICAL DUST UTILIZATION  
FOR THE ZINC FLUOROSILICATE PRODUCTION**

In the article, the process of zinc fluorosilicate obtaining from domestic technogenic raw materials is studied. The regularities of synthesis ensuring the maximum yield of crystalline zinc fluorosilicate are established. The optimum parameters of the technological process are: concentration of silicofluoric acid – 18–22% by weight; excess fluorosilicic acid against the stoichiometric amount – 3–5% by weight; the synthesis temperature is 70–80°C; the evaporation temperature is 60–80°C. According to the data of X-ray phase and chemical analysis, the obtained product contains 87–91%  $ZnSiF_6 \cdot 6H_2O$  and 8–12%  $CaSiF_6 \cdot 2H_2O$ . The developed technological mode of obtaining zinc fluorosilicate allows to get a quality product not inferior of imported analogues.

**Key words:** hexafluorosilicic acid, dust of gas cleaning of a metallurgical plant, synthesis, zinc fluorosilicate.

**Введение.** В настоящее время в Республике Беларусь потребность в высокоэффективных химических добавках, обеспечивающих повышение долговечности бетона, удовлетворяется в основном за счет импорта. Ранее на ОАО «Гомельский химический завод» для улучшения свойств бетона производился пропиточный состав «Сифтом» на основе кремнефторида магния, технология которого была разработана в Белорусском государственном технологическом университете [1–4]. Особенностью данной технологии является использование импортного каустического магнезита марки ПМК-75, полученного в результате улавливания пыли, образующейся при производстве спеченного периклазового порошка на ОАО «Комбинат «Магнезит» (Россия), и кремнефтористоводородной кислоты с концентрацией 12–16%, которая является побочным продуктом производ-

ства экстракционной фосфорной кислоты на ОАО «Гомельский химический завод». Стоимость каустического магнезита марки ПМК-75 в настоящее время составляет примерно 330 долл. США за тонну без учета транспортных расходов, что существенно удорожает конечный продукт. Авторами [5] в качестве исходного компонента предложено использовать брусит, что является нецелесообразным ввиду отсутствия его в Беларуси. Кроме того, применение кремнефтористоводородной кислоты с указанной концентрацией приводит к образованию низкоконцентрированных растворов кремнефторида магния, что влечет за собой увеличение расходов на энергоресурсы при выделении кристаллического продукта.

Анализ литературных данных показал, что наряду с кремнефторидом магния для поверхностной обработки бетона успешно применяется

кремнефторид цинка. Для получения указанного материала предлагается использовать пыль газоочистки ОАО «Белорусский металлургический завод» – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания», которая характеризуется постоянством химического состава (табл. 1), и кремнефтористоводородную кислоту с концентрацией 40–45 мас. %, образующуюся на ОАО «Стеклозавод «Неман».

В настоящее время пыль газоочистки металлургического завода применяется в производстве портландцементного клинкера на ОАО «Белорусский цементный завод» в качестве железосодержащей корректирующей добавки. Однако вследствие высокого содержания оксида цинка в пыли качество цемента является крайне не стабильным.

Обзор литературных и патентных источников показал, что в отличие от других фторсодержащих солей кремнефториды двухвалентных металлов, в частности кремнефториды цинка, магния и кальция, относятся к числу мало изученных соединений. Имеющиеся публикации [6–17] носят не полный, а порой и противоречивый характер.

Таким образом, целью настоящего исследования является разработка технологических параметров синтеза кремнефторида цинка из техногенного сырья и получение железосодержащего сырья, которое может быть использовано в производстве портландцементного клинкера и расширяющих сульфоферритных добавок для растворов и бетонов.

**Результаты исследований.** Разработка режима синтеза кремнефторида цинка велась, варьируя следующими технологическими параметрами: концентрациями реагентов и их соотношением, температурой синтеза и выпаривания раствора, порядком сливания реагентов –

водной суспензии пыли газоочистки и раствора кремнефтористоводородной кислоты. Синтез кремнефторида цинка проводили в трехгорлой колбе, помещенной в термостат, что обеспечивало постоянство заданных температурных параметров. Последовательность операций синтеза была следующей: в реакционный сосуд заливали расчетное количество кремнефтористоводородной кислоты, взятой с избытком против стехиометрии. При постоянном перемешивании в кислоту в один прием вводили пыль газоочистки. Полученную суспензию разделяли фильтрованием, после чего фильтрат упаривали на водяной бане. Кристаллический продукт подвергали сушке в сушильном шкафу до постоянной массы.

Идентификацию целевого продукта производили химическим и рентгенофазовым анализами (дифрактометр ДРОН-3 с излучением  $\text{CuK}_\alpha$ ) и ИК-спектроскопией (спектрограф SPEKORD-751R).

На первом этапе ставили задачу выяснить роль концентрации кремнефтористоводородной кислоты на выход кремнефторида цинка. Температура синтеза 25°C и избыток кремнефтористоводородной кислоты против стехиометрического количества 2 мас. % поддерживались постоянными. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Из представленных результатов видно, что наиболее предпочтительной является концентрация кремнефтористоводородной кислоты 18–22 мас. %. При ее увеличении свыше 25 мас. % в процессе синтеза образуется суспензия кристаллов кремнефторида цинка в его насыщенном растворе, что затрудняет разделение целевого продукта от нерастворимого в кислоте остатка.

Таблица 1

Химический состав пыли газоочистки ОАО «Белорусский металлургический завод»

Оксиды	ZnO	FeO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Прочие
Содержание, мас. %	43,0–47,0	38,0–40,0	4,0–6,0	1,5–3,0	0,5–2,0	0,5–2,0	3,0–5,0

Таблица 2

Влияние концентрации кремнефтористоводородной кислоты на выход кремнефторида цинка

Концентрация H <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> , мас. %	Выход кремнефторида цинка, мас. %	Примечание
5	88,9	Выпадение кристаллов ZnSiF <sub>6</sub> · 6H <sub>2</sub> O из его раствора не обнаружено
10	90,1	
15	91,7	
20	92,2	
25	–	Высокая вязкость суспензии. Перемешивание затруднительно. Наблюдается выпадение кристаллов ZnSiF <sub>6</sub> · 6H <sub>2</sub> O
30	–	
35	–	
40	–	
45	–	

На следующем этапе работы оценивали влияние порядка сливания исходных реагентов на выход кремнефторида цинка. Температура синтеза 25°C, концентрация кремнефтористоводородной кислоты 20 мас. % и ее избыток против стехиометрического количества 2 мас. % поддерживались постоянными.

Для получения кремнефторида цинка использовали суспензию пыли газоочистки различной концентрации. Реагент вводили в реактор в один прием. Результаты изучения порядка сливания исходных компонентов на выход кремнефторида цинка представлены в табл. 3, из которой видно, что при одинаковых концентрационных параметрах синтеза применение порядка сливания компонентов, предусматривающего введение кремнефтористоводородной кислоты в водную суспензию пыли газоочистки, в большинстве случаев приводит к снижению выхода  $ZnSiF_6 \cdot 6H_2O$ .

Очевидно, это связано с протеканием процесса образования кремнефторида цинка в две стадии. В начальный момент времени раствор пересыщен ионами  $Zn^{2+}$  по отношению к ионам  $SiF_6^{2-}$ , в результате чего образуется фторид цинка. Впоследствии раствор пересыщается ионами  $SiF_6^{2-}$ , что приводит к образованию кремнефторида цинка. Однако до 3% фторида цинка остается, что снижает выход кристаллического кремнефторида цинка и загрязняет его продуктами синтеза. При обратном порядке сливания реагентов образование кремнефторида цинка протекает в одну стадию.

Осуществление обратного порядка сливания реагентов, а именно введение в раствор ки-

слоты суспензии пыли газоочистки, затрудняет равномерное дозирование последней. Исходя из вышеизложенного, дальнейшие исследования по изучению режима синтеза кремнефторида цинка проводились при смешивании исходных компонентов, предполагающем добавление порошкообразной пыли газоочистки в раствор кремнефтористоводородной кислоты, что обеспечивает максимальный выход целевого продукта и упрощает аппаратное оформление технологического процесса за счет исключения стадии приготовления водной суспензии пыли газоочистки.

Из литературных и патентных источников известно, что на выход солей щелочноземельных металлов кремнефтористоводородной кислоты оказывает влияние соотношение реагентов. Таким образом, следующим этапом работы явилось изучение влияния соотношения реагентов на выход целевого продукта. Для этого варьировали избыток кремнефтористоводородной кислоты против стехиометрического количества от 0 до 8 мас. %. Зависимость выхода кремнефторида цинка от избытка против стехиометрически необходимого количества кремнефтористоводородной кислоты приведена в табл. 4.

Видно, что с увеличением избытка кислоты до 4–6 мас. % выход кремнефторида цинка растет. Объяснить это можно тем, что в системе  $ZnSiF_6 - H_2SiF_6 - H_2O$  при повышении содержания свободной кремнефтористоводородной кислоты в маточном растворе снижается растворимость кремнефторида цинка [14, 15], а это в свою очередь положительно сказывается на выходе  $ZnSiF_6 \cdot 6H_2O$ .

Таблица 3

**Зависимость выхода кремнефторида цинка от порядка сливания реагентов**

Концентрация суспензии пыли газоочистки, мас. %	Выход кремнефторида цинка при порядке сливания, мас. %	
	прямой (добавление кремнефтористоводородной кислоты к суспензии пыли газоочистки)	обратный (внесение в кремнефтористоводородную кислоту суспензии пыли газоочистки)
5	87,8	92,0
10	89,0	92,3
20	91,1	93,3

Таблица 4

**Влияние технологических параметров синтеза на выход кремнефторида цинка**

Избыток кремнефтористоводородной кислоты против стехиометрического количества, мас. %	Выход кремнефторида цинка, %, при температуре синтеза, °C				
	30	50	70	90	110
0	78,6	87,3	89,7	88,4	85,1
2	82,4	88,5	92,2	90,3	86,2
4	83,6	89,7	92,6	90,8	86,5
6	83,8	91,9	92,7	91,0	88,3
8	83,9	90,7	92,6	90,4	88,1

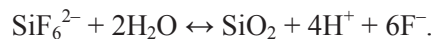
Применение избытка кремнефтористоводородной кислоты более 6 мас. % не оказывает существенного влияния на выход кремнефторида цинка. На основании данных по изучению зависимости выхода продукта реакции от стехиометрии сделан вывод о необходимости применения избытка кремнефтористоводородной кислоты при синтезе кремнефторида цинка, так как в данном случае реакция при прочих равных условиях протекает более полно и согласуется с литературными источниками [14, 15].

Рентгенографический анализ образца, полученного по оптимальному режиму, показал, что основной фазой является кремнефторид цинка ( $d = 4,67; 4,13; 2,92; 2,60; 1,89; 1,73 \text{ \AA}$ ), и в качестве примеси присутствует кремнефторид кальция ( $d = 5,30; 4,85; 4,25; 3,44; 3,31; 2,29 \text{ \AA}$ ). На ИК-спектре наблюдаются полосы поглощения в интервалах  $450\text{--}770 \text{ см}^{-1}$ ,  $1600\text{--}1700 \text{ см}^{-1}$  и  $3400\text{--}3600 \text{ см}^{-1}$ , которые характерны для  $\text{ZnSiF}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными [18]. По результатам химического анализа полученный продукт содержит  $\text{ZnSiF}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  – 87–91%,  $\text{CaSiF}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  – 8–12%. Значение содержания основного вещества хорошо согласуется с расчетным.

При изучении влияния температуры реакционной смеси на выход кремнефторида цинка варьировали температурой в диапазоне от 30 до  $110^\circ\text{C}$ . При температуре выше  $110^\circ\text{C}$  синтез не проводился, так как начинает протекать гидролиз кремнефторида цинка с образованием фторида цинка и кремневой кислоты [6, 8, 19, 20]. Было установлено, что в ходе синтеза при различных температурах выход кремнефторида цинка изменяется (табл. 4). Как видно из представленных данных, при повышении температуры реакционной смеси до  $70\text{--}80^\circ\text{C}$  и сохранении неизменными всех остальных параметров синтеза выход кремнефторида цинка увеличивается, при дальнейшем же росте температуры наблюдается его снижение. Это связано с тем, что повышение температуры от 30 до  $70^\circ\text{C}$  приводит к увеличению выхода кремнефторида цинка, поскольку температурный фактор при синтезе хорошо растворимых веществ играет весьма значительную роль [21] вследствие того, что скорость образования малорастворимых веществ пропорциональна величине  $e^{-T}$ , в то время как для систем хорошо растворимых веществ эта величина пропорциональна  $e^{-1/T}$  [22].

При дальнейшем повышении температуры до  $90^\circ\text{C}$  и более, несмотря на уменьшение вязкости и снижение диффузионных торможений на пути проникновения кислоты в глубь частичек цинксодержащего компонента, наблюдается снижение выхода кремнефторида цинка. Объяснить это можно тем, что при температу-

рах выше  $90^\circ\text{C}$  кремнефторид цинка подвергается гидролитическому разложению с образованием аморфного оксида кремния и фторида цинка, наличие последнего регистрируется рентгенографически. Кроме того, содержащиеся в растворе ионы  $\text{SiF}_6^{2-}$  также неустойчивы и склонны к гидролизу по реакции

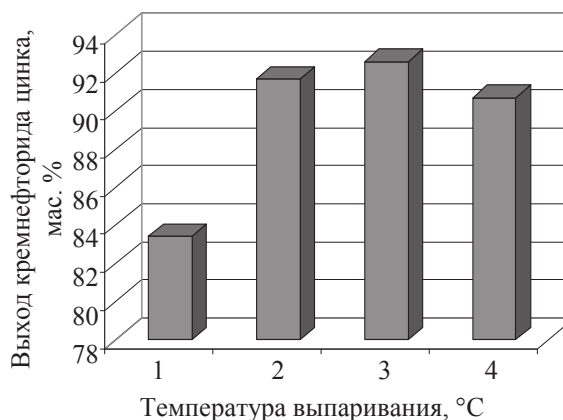


В образце, полученном при температуре  $90^\circ\text{C}$ , на рентгенограмме присутствуют дифракционные максимумы, соответствующие кремнефториду цинка и фториду цинка, что свидетельствует о протекании процесса гидролиза. Полученные экспериментальные данные хорошо коррелируют с результатами работы [18]. На рентгенограмме образца, полученного при температуре  $70^\circ\text{C}$ , видно, что основной фазой является кремнефторид цинка ( $d = 4,67; 4,13; 2,92; 2,60; 1,89; 1,73 \text{ \AA}$ ). Таким образом, оптимальная температура синтеза кремнефторида цинка –  $70\text{--}80^\circ\text{C}$ , при которой при прочих равных условиях достигается максимальный выход (до 92 мас. %) кремнефторида цинка.

При выделении кристаллического кремнефторида цинка из раствора исследовали влияние температуры выпаривания на его выход. Как было отмечено выше, при температуре более  $90^\circ\text{C}$  кремнефторид цинка подвергается гидролитическому разложению, поэтому для выделения продукта в кристаллическом виде процесс выпаривания осуществляется при температуре ниже указанной.

При изучении влияния температуры выпаривания раствора кремнефторида цинка на выход кристаллов  $\text{ZnSiF}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  варьировали температуру выпаривания в диапазоне от 30 до  $90^\circ\text{C}$ .

Из рисунка видно, что с повышением температуры выпаривания увеличивается выход кристаллического кремнефторида цинка.



Влияние температуры выпаривания раствора кремнефторида цинка на выход кристаллического продукта:  
1 –  $30^\circ\text{C}$ ; 2 –  $50^\circ\text{C}$ ; 3 –  $70^\circ\text{C}$ ; 4 –  $90^\circ\text{C}$



Можно предположить, что рост температуры увеличивает скорость образования зародышей кристаллов не только вследствие уменьшения их критического размера, но и в результате уменьшения гидратации ионов, что облегчает их объединение в зародыш. Кроме того, с повышением температуры снижается поверхностное натяжение на границе между раствором и образующимися зародышами, а следовательно, уменьшается и работа, необходимая для их образования [21].

**Заключение.** На основании проведенных исследований оптимизирован режим синтеза

кремнефторида цинка из техногенного сырья. Установлено, что оптимальными параметрами синтеза являются: концентрация кремнефтористоводородной кислоты – 18–22 мас. %; избыток кремнефтористоводородной кислоты против стехиометрического количества – 3–5 мас. %; температура синтеза – 70–80°C; температура выпаривания – 60–80°C.

Разработанный технологический режим получения кремнефторида цинка позволяет производить продукт, по качеству не уступающий известным отечественным («Сифтом») и импортным («Burke-0-Lith») аналогам.

### Литература

1. Хотянович О. Е., Кузьменков М. И. Флюатирование – эффективный способ повышения эксплуатационных свойств бетона // *Строительная наука и техника*. 2011. № 4 (37). С. 21–24.
2. Способ получения гексафторсиликата магния: пат. 7658 Респ. Беларусь, МПК7 С 01В 33/10 / М. И. Кузьменков, О. Е. Трахимчик, А. А. Людков, В. Е. Первинкин, В. А. Самсонов, А. М. Козлова; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. № а 20030011; заявл. 08.01.2003; опубл. 13.09.2005.
3. Трахимчик О. Е. Повышение эксплуатационных свойств бетона обработкой растворами на основе гексафторсиликата магния: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11; 05.17.01. Минск, 2006. 261 л.
4. Хотянович О. Е. Флюат на основе гексафторсиликата цинка для повышения долговечности бетона // *Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: материалы X Междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 15–16 окт. 2013 г.* Минск, 2014. С. 230–235.
5. Кузьменков М. И., Кузьменков Д. М., Велюго Ю. В. Белорусская высокоэффективная кольматирующая добавка для поверхностной и объемной обработки железобетона // *Инновации в бетоне-ведении, строительном производстве и подготовке инженерных кадров: сб. ст.: в 2 ч.* Минск, 2016. С. 125–127.
6. Рысс И. Г. Химия фтора и его неорганических соединений. М.: Гос. науч.-техн. изд-во хим. лит-ры, 1956. 719 с.
7. Габриелова М. Г., Морозова М. А. Производство неорганических ядохимикатов. М.: Химия, 1964. 354 с.
8. Позин М. Е. Технология минеральных солей. Л.: Химия, 1961. 407 с.
9. Зайцев В. А., Новиков А. А., Родин В. И. Производство фтористых соединений при переработке фосфатного сырья. М.: Химия, 1982. 248 с.
10. Габриелова М. Г. Кремнефториды магния, кальция и цинка // *Исследования по прикладной химии: сб. ст. М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 244–248.*
11. Лопаткина Г. А., Колосова Т. Н. Получение чистых кремнефторидов магния и цинка // *Журнал прикладной химии*. 1969. № 3. С. 684–686.
12. Песина Э. Я. Кремнефториды // *Фторсоли: Обзорная информация. Прикладная химия. М.: НИИТЭХИМ, 1978. С. 4–12.*
13. Исикава Н., Кобаяси Е. Фтор: Химия и применение. М.: Мир, 1982. 211 с.
14. Лопаткина Г. А., Колосова Т. Н., Грозных М. А. Получение технического кремнефторида магния из концентрированной кремнефтористоводородной кислоты // *Журнал прикладной химии*. 1968. № 7. С. 1608–1611.
15. Исследование процесса термического разложения кремнефторида магния в распылительном реакторе / Т. Н. Колосова [и др.] // *Журнал общей химии*. 1972. № 12. С. 1052–1056.
16. Способ получения кремнефторидов магния и цинка: а. с. 224496 СССР, МКИ5 С 01В 33/10 / Г. А. Лопаткина, Т. Н. Колосова, Т. А. Грозных, П. В. Вандышева. № 1096893/23-26; заявл. 11.08.66; опубл. 12.08.68.
17. Способ получения фтористых и кремнефтористых солей: а. с. 538983 СССР, МКИ5 С 01В 9/08, 33/10 / В. С. Калач, Н. С. Богданова, Т. К. Михалева. № 2029805/26; заявл. 03.06.74; опубл. 15.12.76.
18. Атлас инфракрасных спектров поглощения и рентгенометрических данных комплексных фторидов металлов IV и V групп / Р. Л. Давидович [и др.]. М.: Наука, 1972. 252 с.
19. Евстропьев К. С., Торопов Н. А. Химия кремния и физическая химия силикатов. М.: Госстройиздат, 1956. 248 с.
20. Островская Т. В., Амирова С. А. Дегидратация и термическое разложение гексафторсиликатов // *Изв. вузов СССР. Сер. Химия и химическая технология*. 1967. № 4. С. 371–374.

21. Матусевич Л. Н. Кристаллизация из растворов в химической промышленности. М.: Химия, 1968. 304 с.

22. Буянов Р. А., Криворучко О. П. Разработка теории кристаллизации малорастворимых гидроксидов металлов и научных основ приготовления катализаторов из веществ этого класса // Кинетика и катализ. 1976. № 3. С. 765–775.

### References

1. Khotyanovich O. E., Kuz'menkov M. I. Surface treatment is an effective way to improve the performance of concrete. *Stroitel'naya nauka i tekhnika* [Building science and technology], 2011, no. 4 (37), pp. 21–24 (In Russian).
2. Kuz'menkov M. I., Trakhimchik O. E. *Sposob polucheniya geksaftorsilikata magniya* [Process for the preparation of magnesium fluorosilicate]. Patent BY, no. 7658, 2005.
3. Trakhimchik O. E. *Povysheniye ekspluatatsionnykh svoystv betona obrabotkoy rastvorami na osnove geksaftorsilikata magniya. Dis. kand. tekhn. nauk* [Increase of operational properties of concrete by treatment with solutions based on magnesium fluorosilicate. Kand. Diss.]. Minsk, 2006. 261 p.
4. Khotyanovich O. E. [Fluats based on fluosilicates of zinc to enhance the durability of concrete]. *Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Energo- i materialosberegayushchiye ekologicheski chistyye tekhnologii)* [X International Scientific and Technical Conference (Energy and material-saving environmentally friendly technologies)]. Minsk, 2014, pp. 230–235 (In Russian).
5. Kuz'menkov M. I., Kuz'menkov D. M., Velyugo Yu. V. Belarusian high-efficiency collation additive for surface and bulk processing of reinforced concrete. *Innovatsii v betonovedenii, stroitel'nom proizvodstve i podgotovke inzhenernykh kadrov: sbornik statey* [Innovations in concrete, construction and engineering training: digest of articles]. Minsk, 2016, pp. 125–127 (In Russian).
6. Ryss I. G. *Khimiya ftora i ego neorganicheskikh soedineniy* [Chemistry of fluorine and its inorganic compounds]. Moscow, Gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatel'stvo khimicheskoy literatury Publ., 1956. 719 p.
7. Gabriellova M. G., Morozova M. A. *Proizvodstvo neorganicheskikh yadokhimikatov* [Production of inorganic pesticides]. Moscow, Khimiya Publ., 1964. 354 p.
8. Pozin M. E. *Tekhnologiya mineral'nykh soley* [Technology of mineral salts]. Leningrad, Khimiya Publ., 1961. 407 p.
9. Zaytsev V. A., Novikov A. A., Rodin V. I. *Proizvodstvo ftoristykh soedineniy pri pererabotke fosfatnogo syr'ya* [Production of fluoride compounds during processing of phosphate raw materials]. Moscow, Khimiya Publ., 1982. 248 p.
10. Gabriellova M. G. Magnesium, calcium and zinc fluorosilicates. *Issledovaniya po prikladnoy khimii: sbornik statey* [Research in Applied Chemistry: digest of articles]. Moscow, Izdatel'stvo AN SSSR Publ., 1955, pp. 244–248 (In Russian).
11. Lopatkina G. A., Kolosova T. N. Preparation of pure magnesia and zinc fluorosilicates. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Journal of Applied Chemistry], 1969, no. 3, pp. 684–686 (In Russian).
12. Pesina E. Ya. Silic fluorides. *Ftorsoli: Obzornaya informatsiya. Prikladnaya khimiya* [Fluorosols. Applied chemistry]. Moscow, NIITEKHIM Publ., 1978, pp. 4–12 (In Russian).
13. Isikava N., Kobayasi E. *Ftor: Khimiya i primeneniye* [Fluoride: Chemistry and Applications]. Moscow, Mir Publ., 1982. 211 p.
14. Lopatkina G. A., Kolosova T. N., Groznykh M. A. Production of technical magnesium fluorosilicate from concentrated fluorosilicic acid. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Journal of Applied Chemistry], 1968, no. 7, pp. 1608–1611 (In Russian).
15. Kolosova T. N., Lopatkina G. A., Vaysbeyn M. M., Zakutinskiy V. L. Investigation of the process of thermal decomposition of magnesium fluorosilicate in a spray reactor. *Zhurnal obshchey khimii* [Journal of General Chemistry], 1972, no. 12, pp. 1052–1056 (In Russian).
16. Lopatkina G. A., Kolosova T. N., Groznykh T. A., Vandysheva P. V. *Sposob polucheniya kremneftoridov magniya i tsinka* [Method for the production of magnesium and zinc fluorosilicate]. Copyright certificate of the USSR, no. 224496, 1968.
17. Kalach V. S., Bogdanova N. S., Mikhaleva T. K. *Sposob polucheniya ftoristykh i kremneftoristykh soley* [Method for obtaining fluorine and fluorosilicate salts]. Copyright certificate of the USSR, no. 538983, 1976.
18. Davidovich R. L., Kaydalova T. A., Levchishina T. F., Sergienko V. I. *Atlas infrakrasnykh spektrov pogloshcheniya i rentgenometricheskikh dannykh kompleksnykh ftoridov metallov IV i V grupp* [Atlas of infrared absorption spectra and X-ray data of complex fluorides of metals of groups IV and V]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 252 p.

19. Evstrop'yev K. S., Toropov N. A. *Khimiya kremniya i fizicheskaya khimiya silikatov* [Chemistry of silicon and physical chemistry of silicates]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1956. 248 p.

20. Ostrovskaya T. V., Amirova S. A. Dehydration and thermal decomposition of fluorosilicate. *Izvestiya vuzov SSSR. Ser. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Proceedings of the USSR universities. Ser. Chemistry and Chemical Engineering], 1967, no. 4, pp. 371–374 (In Russian).

21. Matusevich L. N. *Kristallizatsiya iz rastvorov v khimicheskoy promyshlennosti* [Crystallization from solutions in the chemical industry]. Moscow, Khimiya Publ., 1968. 304 p.

22. Buyanov R. A., Krivoruchko O. P. Development of the theory of crystallization of sparingly soluble metal hydroxides and the scientific basis for the preparation of catalysts from substances of this class. *Kinetika i kataliz* [Kinetics and catalysis], 1976, no. 3, pp. 765–775 (In Russian).

#### Информация об авторах

**Хотянович Оксана Евгеньевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры химической технологии вяжущих материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: okhotyanovich@rambler.ru

**Белов Иван Афанасьевич** – кандидат химических наук, заведующий НИЛ бетонов и композиционных строительных материалов. ГП «Институт НИИСМ» (220014, г. Минск, ул. Минина, 23, Республика Беларусь). E-mail: beton2007@yandex.ru

#### Information about the authors

**Khotyanovich Oksana Evgen'yevna** – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Chemical Technology of Binding Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: okhotyanovich@rambler.ru

**Belov Ivan Afanas'yevich** – PhD (Chemistry), Head of the Research Laboratory of Concrete and Composite Building Materials. SE “NIISM Institute” (23, Minina str., 220014, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: beton2007@yandex.ru

Поступила 27.04.2017