

# ГЕОЭКОЛОГИЯ

## GEOECOLOGY

---

УДК 628.316.12:661.183.6

**А. С. Василевский, И. В. Войтов**

Белорусский государственный технологический университет

### **ИЗВЛЕЧЕНИЕ ФОСФАТОВ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД КАЛЬЦИЙ-СИЛИКАТСОДЕРЖАЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ**

Разработан материал на основе системы трепел – мел, обладающий адсорбционными свойствами по извлечению фосфатов из сточных вод. Показано, что степень адсорбции фосфатов из сточных вод достигает 99,8%, и зависит от параметров синтеза адсорбента и технологического режима обработки сточных вод. Установлен фазовый ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) и химический (54%  $\text{SiO}_2$ , 33%  $\text{CaO}$ , 6%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и др.) состав сорбционного материала. Величина удельной поверхности и удельного объема пор сорбционного материала равна  $88 \text{ м}^2/\text{г}$  и  $0,126 \text{ см}^3/\text{г}$  соответственно. Максимальная сорбционная емкость по фосфатам в пересчете на фосфор составляет  $79,6 \text{ мг P/г}$ . Полученный сорбент сохраняет степень адсорбции выше 90% в течение 5 циклов обработки сточной воды. В отработанном адсорбенте установлено наличие фосфата кальция, гидроксипатита и брусшита. Влажность отработанного адсорбента составляет 89%. Содержание фосфатов в пересчете на фосфор в сухом веществе отработанного адсорбента составляет 3 мас. %.

**Ключевые слова:** фосфаты, трепел, мел, сточные воды, адсорбция, сорбционный материал.

**Для цитирования:** Василевский А. С., Войтов И. В. Извлечение фосфатов из сточных вод кальций-силикатсодержащими материалами // Труды БГТУ. Сер. № 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 2 (247). С. 199–204.

**A. S. Vasileuski, I. V. Voitau**

Belarusian State Technological University

### **EXTRACTION OF PHOSPHATES FROM WASTE WATER OF CALCIUM-SILICATE-CONTAINING MATERIALS**

A material has been developed, based on the tripoli – chalk system, which has adsorption properties for the extraction of phosphates from wastewater. It is shown that the degree of adsorption of phosphates from wastewater reaches 99.8%, and depends on the parameters of the synthesis of the adsorbent and the technological regime of wastewater treatment. The phase ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) and chemical (54%  $\text{SiO}_2$ , 33%  $\text{CaO}$ , 6%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , etc.) composition of the sorption material. The specific surface area and specific pore volume of the sorption material is  $88 \text{ м}^2/\text{г}$  and  $0.126 \text{ см}^3/\text{г}$ , respectively. The maximum sorption capacity for phosphates in terms of phosphorus is  $79.6 \text{ mg P/g}$ . The resulting sorbent retains the degree of adsorption above 90% during 5 cycles of waste water treatment. The used adsorbent contains calcium phosphate, hydroxyapatite and brushite. The moisture content of the spent adsorbent is 89%. The content of phosphates in terms of phosphorus in the dry matter of the spent adsorbent is 3 wt. %.

**Key words:** phosphates, tripoli, chalk, waste water, adsorption, sorption material.

**For citation:** Vasileuski A. S., Voitau I. V. Extraction of phosphates from waste water of calcium-silicate-containing materials. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 2 (247), pp. 199–204 (In Russian).

**Введение.** Увеличение поступления фосфора с бытовыми и промышленными сточными водами, вызванное растущей плотностью населения и деятельностью человека, выводит на

новый уровень проблему эвтрофирования водных объектов. Эвтрофикация – процесс роста биологической растительности водоемов, который происходит вследствие превышения баланса

питательных веществ [1]. Подсчитано, что удвоение количества биогенных соединений (фосфора и азота), содержащихся в сточных водах, может увеличить вторичное потребление кислорода более чем в пять раз по сравнению с первичным потреблением, связанным с удалением органических веществ, содержащихся в сточных водах [2].

Фосфор, содержащийся в сточной воде, представлен растворенным неорганическим ортофосфатом, полифосфатом, в органических веществах; в водном растворе полифосфаты также подвергаются гидролизу и восстанавливаются до ортофосфатных форм; доля ортофосфатов составляет около 70–80% от общего фосфора [3]. В Республике Беларусь допустимая концентрация общего фосфора в очищенных сточных водах устанавливается в зависимости от массы органических веществ, поступающих на очистные сооружения канализации, и составляет 4,5 и 2,0 мг Р/дм<sup>3</sup> для очистных сооружений, эквивалентное население (ЭН) для которых составляет 10 001–100 000 и более 100 001 соответственно [4].

Многолетний опыт показал, что биологическая очистка сточных вод как с технико-экономической, так и с экологической точки зрения является безальтернативным вариантом для очистных сооружений, ЭН которых 10 001 и более. Вместе с тем существенным недостатком биологической очистки сточных вод является образование большого количества избыточного активного ила. Технология утилизации ила реализована таким образом, что образующаяся в процессе его обработки иловая вода из уплотнителей и иловых площадок, а также фугат обезвоживания возвращаются в приемную камеру очистных сооружений, т. е. в начало цикла очистки. Концентрация фосфора в них может достигать 200 мг Р/л, что в десять раз превосходит концентрацию в исходных сточных водах [5].

Наиболее распространенный метод очистки сточных вод от фосфатов – коагуляционный, имеет один недостаток, существенно ограничивающий, а зачастую и полностью исключающий дальнейшее использование извлеченного фосфора из сточной воды: в образующемся осадке фосфор находится в недоступной для растений форме.

Извлечение фосфатов в форме, пригодной для использования в сельском хозяйстве, возможно кристаллизационным и сорбционным методами. Кристаллизационный метод реализован в США, Канаде и Японии с образованием фосфатов кальция и магния, магний-аммоний фосфата на центрах кристаллизации, которые затем выводятся из системы. Кристаллизация осуществляется на фильтрах или во взвешенном слое. В качестве затравочного материала используются минералы, содержащие фосфат кальция, костяной уголь, шлак доменных печей и др. [6, 7].

На основе данного метода разработан процесс OSTARA, в результате производится удобрение Crystal Green® [7]. Сорбционный метод наиболее широко реализован в Швеции и Польше с использованием в качестве сорбентов материалов, полученных из природных кальцитов и сепиалитов после высокотемпературной обработки. Среди последних выделяется опока ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), которая относится к группе силикатно-кальциевых осадочных пород морского происхождения, обладающих высокой пористостью и удельной поверхностью. На основе опоки синтезируют сорбционный материал Polonite, извлекающий фосфаты в форме фосфата кальция  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  и гидроксипапатита ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) [8, 9].

Получение сорбционных материалов из природных пород – перспективное направление в исследованиях очистки сточных вод от фосфатов. Ранее нами были получены материалы из смеси трепел – доломит, обработанной при температуре 650–900°C, обладающие сорбционной емкостью по фосфатам до 71 мг Р/г. Фазовый состав полученных материалов характеризовался наличием диоксида ( $\text{CaMg} \cdot (\text{Si}_2\text{O}_6)$ ), ларнита ( $\text{CaSiO}_4$ ) и акерманита ( $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ ) [10].

Целью данной работы была разработка оптимальных параметров синтеза сорбционного материала, обеспечивающего максимальное удаление фосфатов из сточных вод и определение технологических параметров процесса сорбции.

**Основная часть.** В качестве объектов исследования в работе использовали кальций-силикатсодержащие материалы, полученные на основе системы трепел – мел, возвратные потоки очистных сооружений канализации, растворы фосфатов.

В работе использовали трепел месторождения Стальное и мел месторождения Погораны, при обжиге которых регулировали температуру (800, 850 и 900°C), продолжительность прокалкивания (30 и 60 мин), соотношение компонентов в исходной смеси (трепел – мел (85:15 – состав 1, 70:30 – состав 2)). О сорбционных свойствах полученных материалов (рис. 1) судили по величине сорбционной емкости по фосфатам [10], сравнивая ее с величиной, рассчитанной путем аддитивного сложения сорбционных емкостей компонентов исходной смеси, обожженных при тех же температурах, определенную на модельных растворах. Удельную поверхность и удельный объем пор материала определяли на анализаторе удельной поверхности и пористости NOVA 2200 (Quanta Chrome Corporation, США) методом адсорбции азота. Значение рН измеряли потенциометрическим методом милливольтметром типа рН-150 с электродом типа ЭСЛ-45-11 и вспомогательного типа ЭВЛ-1М4.

В работе использовали фугат, отобранный на очистных сооружениях с нагрузкой более 100 001 эквивалентных жителей. Отбор проб проводился в 9:00 в будние дни в период с сентября по ноябрь 2020 г. Содержание фосфатов в пересчете на фосфор в пробах составляло от 115 до 180 мг P/дм<sup>3</sup>.

Растворы фосфатов с концентрацией 100 мг P/л готовили растворением KН<sub>2</sub>РO<sub>4</sub> в дистиллированной воде.

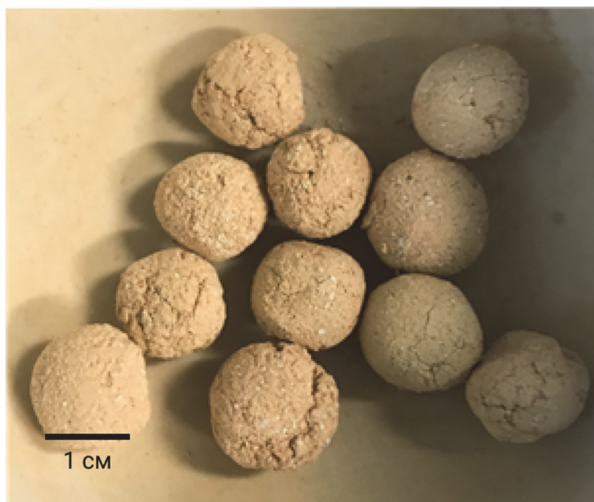


Рис. 1. Полученный в системе трепел – мел сорбционный материал

Исследование процесса удаления фосфатов полученным сорбционным материалом на реальных сточных водах, а также определение

кратности использования полученных материалов проводили на фугате (фильтрованном и исходном с содержанием взвешенных частиц 70–100 и 500–600 мг/дм<sup>3</sup> соответственно). Материал дозировали в пробу объемом 250 см<sup>3</sup> при постоянном перемешивании со скоростью 20 с<sup>-1</sup>, дозировка материалов составила 10 кг/м<sup>3</sup>. Остаточное содержание фосфатов определяли после 120-минутной обработки, промежуточное – при 15 и 30, 60 и 90 мин. Эксперименты проводили при температуре 20 ± 0,5°С. Для выявления возможности использования и влияния кратности на сорбционные свойства материал после обработки отстаивали в течение 30 мин, жидкую фракцию в объеме 220 см<sup>3</sup> удаляли, а к суспензии добавляли 220 см<sup>3</sup> свежего фугата, затем определяли остаточное содержание фосфатов. Эксперимент продолжали до остаточного содержания фосфатов не ниже 90%.

Для определения параметров отработанного материала и выбора вариантов последующего использования полученного материала исследовали его седиментационные свойства и химический состав. Осаждение проводили в цилиндрах объемом 250 см<sup>3</sup>. Объем осадка и концентрацию взвешенных веществ в надосадочной жидкости определяли после 20 мин отстаивания. Отстоявшийся осадок высушивали и определяли влажность, химический и минералогический состав.

Условия получения и структурные свойства полученного сорбента представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Условия получения сорбента и результаты исследования структурных свойств**

№	Условия получения			Результаты исследования					
	T, °C	τ, мин	Массовое соотношение (трепел:мел), %	Химический состав, мас. %*			Фазовый состав	Структурные свойства	
				SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	Удельный объем пор, см <sup>3</sup> /г
1	800	30	85:15	62,9	27,8	5,1	–	88	0,126
2	800	30	70:30	54,3	33,6	5,8	–	85	0,113
3	850	30	85:15	62,5	28,3	5,2	CaO, SiO <sub>2</sub> , CaO · SiO <sub>2</sub> , CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 2SiO <sub>2</sub>	81	0,103
4	850	30	70:30	54,3	32,8	5,7	CaO, SiO <sub>2</sub> , CaO · SiO <sub>2</sub> , CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 2SiO <sub>2</sub>	77	0,091
5	900	30	85:15	63,4	26,5	5,0	CaO, SiO <sub>2</sub> , CaO · SiO <sub>2</sub> , CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 2SiO <sub>2</sub>	62	0,081
6	900	30	70:30	54,4	32,7	5,4	CaO, SiO <sub>2</sub> , CaO · SiO <sub>2</sub> , CaO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 2SiO <sub>2</sub>	58	0,072
7	850	60	85:15	62,4	27,5	5,2	–	71	0,094
8	850	60	70:30	54,4	32,7	5,7	–	68	0,081

\*Соединения, содержание которых менее 5%, в таблице не указаны.

Содержание фосфатов в исходном и очищенном фугате определяли фотоколориметрическим методом в соответствии с ISO 6878 [11]. Химический состав полученного и отработанного сорбционного материала определяли методом энергодисперсионного анализа на электронном микроскопе JSM-5610 LV. Фазовый состав материалов устанавливали методом рентгенофазового анализа на дифрактометре D8 Advance Bruker AXS.

Согласно исследованиям авторов [12], в процессе обжига в результате химического взаимодействия изменяется соотношение между реагирующими компонентами CaO и SiO<sub>2</sub>, образуются промежуточные соединения 2CaO · SiO<sub>2</sub>, CaO · 2SiO<sub>2</sub>, которые являются метастабильными и при повышении температуры переходят в CaO · SiO<sub>2</sub>.

Установлено, что присутствующий в составе трепела Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в количестве 5% связывает CaO в алюминат кальция 12CaO · 7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в последствии преобразующийся в метаалюминат кальция CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, который взаимодействует с метасиликатом кальция CaSiO<sub>3</sub>, при этом образуя геленит 2CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · SiO<sub>2</sub>, а затем и анортит CaO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 2SiO<sub>2</sub> [13, 14]. Присутствие оксида железа Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2,76%) приводит к снижению температуры фазовых превращений [14].

В табл. 2 представлены результаты исследования сорбционной емкости полученных сорбентов.

Таблица 2

**Сорбционная емкость полученных сорбентов, мас. %**

№	Сорбционная емкость, мг P/г		Разница A <sub>1</sub> -A <sub>2</sub>	
	Максимальная A <sub>1</sub>	Рассчитанная A <sub>2</sub>	мг P/г	%
1	61,5	52,4	9,1	15
2	68,4	56,2	12,2	18
3	74,7	53,0	21,7	29
4	78,4	56,7	21,7	28
5	75,5	52,6	22,9	30
6	79,6	56,5	23,1	29
7	75,0	54,4	20,6	27
8	77,8	57,2	20,6	26

\*Номер соответствует номеру в табл. 1.

Максимальная сорбционная емкость по фосфатам сорбента № 6 (табл. 1) 79,6 мг P/г, она достигается материалом 6, полученным при температуре 900°C, при этом удельная поверхность материала составляет 58 м<sup>2</sup>/г. Рассчитанная сорбционная емкость составляет 56,6 мг P/г. Это значит, что совместный обжиг позволяет увеличить сорбционную емкость на 29%. Оптимальным

с точки зрения нескольких параметров является обжиг при температуре 850°C, позволяющий достичь высокой сорбционной емкости 78,4 мг PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>/г при сохранении удельной поверхности 77 м<sup>2</sup>/г и удельного объема пор 0,091 см<sup>3</sup>/г. Увеличение продолжительности прокаливания ведет лишь к уменьшению пористости и удельного объема пор при сохранении максимальной сорбционной емкости на том же уровне.

Определения оптимального времени контакта проводили на фильтрованном и исходном фугате с использованием материала № 4 с удельной поверхностью 77 м<sup>2</sup>/г. Результаты исследования представлены на рис. 2.

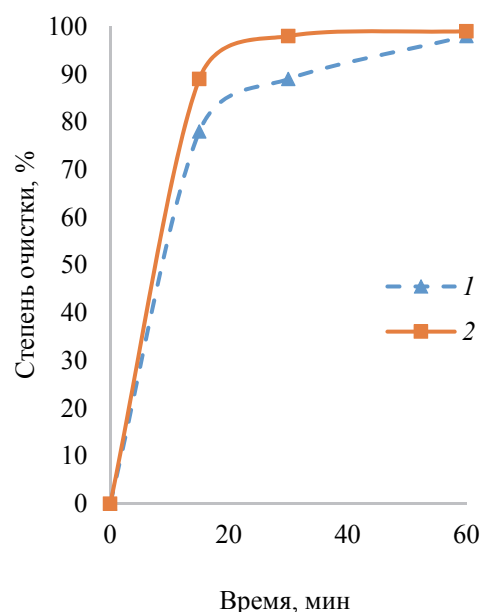


Рис. 2. Зависимость степени адсорбции фосфатов в фугате от продолжительности контакта: 1 – исходный; 2 – фильтрованный

Как показано на рис. 2, степень очистки выше 80% наблюдается уже при 20-минутной обработке исходного фугата и 90% при обработке фильтрованного фугата. Степень очистки после 120 мин обработки составляет 99,8% для фильтрованного фугата и 98,5% для исходного. Степень очистки при обработке исходного фугата ниже, связано это с «загрязнением» поверхности материала взвешенными веществами и органическими примесями фугата.

Результаты определения кратности использования полученного сорбционного материала показаны на рис. 3. Как видно, степень очистки для первого и второго цикла обработки составляет 99,3 и 98,0% и постепенно снижается на 3-, 4- и 5-м цикле, остановившись на уровне 91%. Уровень pH с 6,5–7,0 увеличивается при контакте до 9,0–9,5 и находится в этом диапазоне в течение всех пяти циклов обработки.

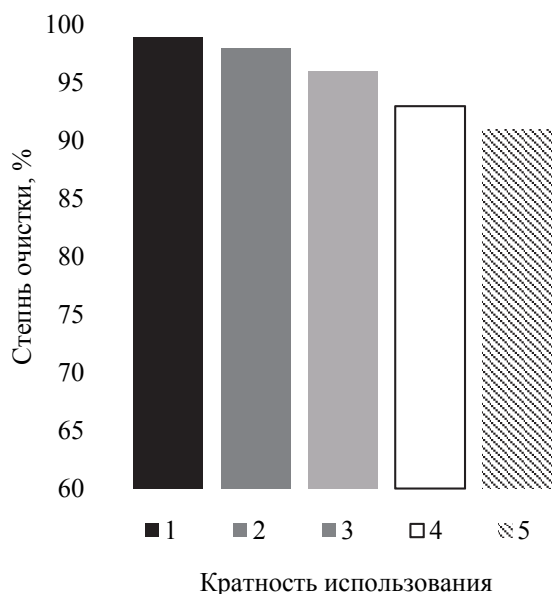


Рис. 3. Зависимость степени очистки фугата от кратности использования полученного сорбционного материала

Химический анализ отработанного материала показал, что содержание фосфора в сухом веществе составляет 3 мас. %. По данным рент-

генофазового анализа установлено наличие в составе отработанного материала фосфата кальция, гидроксипатита и брушита.

Полученный материал характеризуется следующими седиментационными свойствами: после 20-минутного отстаивания объем осадка не превышает 14%, концентрация взвешенных веществ в надосадочной жидкости не превышает 240 мг/дм<sup>3</sup>, а соответствующая этому степень уноса – 2,5%. Влажность образовавшегося осадка составляет 89%.

**Выводы.** Получен сорбционный материал в системе трепел – мел, содержащий в своем составе Si, Ca и Al. Установлено, что формирование пористой структуры зависит от условий получения сорбционного материала, она характеризуется удельным объемом пор 0,126 см<sup>3</sup>/г и удельной поверхностью 88 м<sup>2</sup>/г. Максимальная степень адсорбции полученного материала составляет 99,8% при 120-минутной обработке сточной воды. Максимальная сорбционная емкость по фосфатам составляет 79,6 мг P/г. Полученный сорбент сохраняет степень адсорбции выше 90% в течение 5 циклов обработки сточной воды. Содержание фосфатов в пересчете на фосфор в сухом веществе отработанного адсорбента составляет 3 мас. %.

#### Список литературы

1. Долина Л. Ф. Очистка сточных вод от биогенных элементов: монография. Днепропетровск: Континент, 2011. 198 с.
2. Mikosz J., Mucha Z. Validation of design assumptions for small wastewater treatment plant modernization in line with new interpretation of legal requirements // *Ochrona Srodowiska*. 2014. № 36 (1). S. 45–49.
3. Гогина Е. С. Удаление биогенных элементов из сточных вод / Моск. гос. строит. ун-т. М., 2010. 120 с.
4. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Порядок установления нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод: ТКП 17.06-08-2012 (02120). Введ. 01.01.2012. Минск: Минприроды, 2012. 73 с.
5. Nitrogen and Phosphorus-Rich Sidestreams: Managing the Nutrient Merry-Go-Round / Н. Phillips [et al.] // *Proceedings of the Water Environment Federation*. 2006. No. 7. P. 5282–5304.
6. Towards global phosphorus security: A systems framework for phosphorus recovery and reuse options / D. Cordell [et al.] // *Chemosphere*, 2011. Vol. 84, no. 6. P. 747–758.
7. Sedlak R. Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater. Principles and Practice. New York: Lewis Publishers, 1991. 256 p.
8. Bird S. C., Drizo A. Investigations on phosphorus recovery and reuse as soil amendment from electric arc furnace slag filters // *J. Environ. Sci. and Health. Part A*. 2009. Vol. 44, no. 13. P. 1476–1483.
9. Renman A., Renman G. Long-term phosphate removal by the calcium-silicate material Polonite in wastewater filtration systems // *Chemosphere*. 2010. Vol. 79. P. 659–664.
10. Василевский А. С., Войтов И. В. Получение материалов для очистки сточных вод от фосфатов // *Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология*. 2020. № 2. С. 169–175.
11. Качество воды. Определение фосфора. Спектрометрический метод с молибдатом аммония: СТБ ISO 6878–2005. Минск: БелГИМ, 2005. 20 с.
12. Бабкова Н. М. Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов. Минск: Выш. шк., 2007. 301 с.
13. Кузнецова Т. В., Кудряшов И. В., Тимашев В. В. Физическая химия вяжущих материалов. М.: Выш. шк., 1989. 384 с.
14. Справочник по химии цемента / под ред. Б. В. Волконского, Л. Г. Судакаса. Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1980. 223 с.



### References

1. Dolina L. F. *Ochistka stochnykh vod ot biogennykh elementov: monografiya* [Wastewater treatment from biogenic elements: monograph]. Dnepropetrovsk, Continent Publ., 2011. 198 p.
2. Mikosz J., Mucha Z. Validation of design assumptions for small wastewater treatment plant modernization in line with new interpretation of legal requirements. *Ochrona Srodowiska*, 2014, no. 36 (1), pp. 45–49.
3. Gogina E. S. *Udalenie biogennykh elementov iz stochnykh vod* [Removal of nutrients from wastewater]. Moscow, 2010. 120 p.
4. ТКР 17.06-08-2012 (02120). Environmental protection and nature management. Hydrosphere. The procedure for establishing standards for permissible discharges of chemical and other substances in wastewater. Minsk, Minprirody Publ., 2012. 73 p. (In Russian).
5. Philips H., Kobylinku E., Barnard J., Wallis-Lage C. Nitrogen and Phosphorus-Rich Sidestreams: Managing the Nutrient Merry-Go-Round. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2006, no. 7, pp. 5282–5304.
6. Cordell D., Rosemarin A., Schroder J., Smit A. Towards global phosphorus security: A systems framework for phosphorus recovery and reuse options. *Chemospher*, 2011, vol. 84, no. 6, pp. 747–758.
7. Sedlak R. Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater. Principles and Practice. New York, Lewis Publishers, 1991. 256 p.
8. Bird S. C., Drizo A. Investigations on phosphorus recovery and reuse as soil amendment from electric arc furnace slag filters. *J. Environ. Sci. and Health. Part A*, 2009, vol. 44, no. 13, pp. 1476–1483.
9. Renman A., Renman G. Long-term phosphate removal by the calcium-silicate material Polonite in wastewater filtration systems. *Chemosphere*, 2010, vol. 79, pp. 659–664.
10. Vasileuski A. S., Voitau I. V. Obtaining materials for purification of waste water from phosphates. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology, 2020, no. 2, pp. 169–175 (In Russian).
11. STB ISO 6878–2005. Water quality. Determination of phosphorus. Spectrometric method with ammonium molybdate. Minsk, BelGIM Publ., 2005. 20 p. (In Russian).
12. Babkova N. M. *Fizicheskaya khimiya tugoplavkikh nemetalicheskikh i silikatnykh materialov* [Physical chemistry of refractory non-metallic and silicate materials]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 2007. 301 p.
13. Kuznetsova T. V., Kudryashov I. V., Timashev V. V. *Fizicheskaya khimiya vyazhushchikh materialov* [Physical chemistry of binders]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 384 p.
14. *Spravochnik po khimii tsementa* [Handbook on the chemistry of cement]. Edit. by B. V. Volkonsky, L. G. Sudakas. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1980. 223 p.

### Информация об авторах

**Василевский Андрей Сергеевич** – аспирант кафедры промышленной экологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: andrey-wasilewskiy@mail.ru

**Войтов Игорь Витальевич** – доктор технических наук, профессор, ректор. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: rector@belstu.by

### Information about the authors

**Vasileuski Andrei Syargeyevich** – PhD student, the Department of Industrial Ecology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andrey-wasilewskiy@mail.ru

**Voitau Ihar Vital'evich** – DSc (Engineering), Professor, Rector. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rector@belstu.by

Поступила 30.04.2021