

УДК 628.316:54:544.72

Е. Г. Сапон, В. Н. Марцунь

Белорусский государственный технологический университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ФОСФАТОВ
МАТЕРИАЛАМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ ИЗ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ И ОТХОДОВ**

Ограничение поступления соединений фосфора в водные объекты имеет важное значение для регулирования антропогенной эвтрофикации. Избыточное поступление фосфора приводит к изменению их трофического статуса. Увеличение трофности ведет к «цветению» и снижению качества воды.

В работе проведено сравнение и выбор доступных материалов для удаления фосфатов из сточных вод на очистных сооружениях. Были отобраны доступные и недорогие материалы, содержащие Al, Fe, Ca и Mg. Испытан ряд материалов различного происхождения: природное сырье, отходы производства и промышленный сорбент. Установлены зависимости степени очистки по фосфатам от удельного расхода материалов.

Среди испытанных материалов наиболее эффективными являются отработанный катализатор крекинга углеводородов нефти (ОКК), шлам водоподготовки (ШВП), электросталеплавильный шлак (ЭСПШ), доломит, термообработанный при 700°C и Polonite. Установлены значения предельной емкости по фосфатам для ОКК, ШВП, ЭСПШ и доломита термообработанного, которые соответственно равны: 21,2; 13,6; 35,3, и 70,8 мг PO_4^{3-} /г. Меньшей степенью очистки от фосфатов характеризуются необработанное природное сырье (мел, глина, доломит, трепел) и осадки электрокоагуляционной очистки сточных вод.

Результаты исследований, полученные в лабораторных условиях, подтверждены на сточных водах очистных сооружений канализации.

Ключевые слова: эвтрофикация, фосфаты, очистка сточных вод, отходы производства.

Ye. G. Sapon, V. N. Martsul

Belarusian State Technological University

**PHOSPHATES PURIFICATION OF WASTE WATER
BY NATURAL MATERIALS AND INDUSTRIAL WASTES
(COMPARATIVE STUDY)**

The management phosphates in freshwater has significant importance to regulate eutrophication. Phosphate excess leads to highly undesirable changes in ecosystems structure. The increasing of water body trophicity can result in water quality deterioration.

This paper presents the testing results of reactive materials used for phosphorus removal from wastewater at sewage treatment plant. Twelve materials of different origin available in Belarus were tested as potential reactive materials for phosphates removal. They are natural materials, industrial by-products and manufactured sorbents.

Based on chemical composition the available and inexpensive materials rich in Al, Fe, Mg and Ca were selected. Relationship between purification degree of phosphates and specific material consumption (mg/mg PO_4^{3-}) was investigated to choose potential reactive materials for phosphorus. Four materials (water conditioning sludge (WCS), dead-catalyst of petroleum hydrocarbon cracking (DCC), electric arc furnace slug (EAF-slug), dolomite burnt at 700°C) have been chosen for detailed sorption tests. WCS, DCC, EAF-slug and burnt dolomite have the apparent sorption capacities of: 13.6; 21.2; 35.3; 70.8 mg PO_4^{3-} /g respectively. Results have shown that the raw natural materials (chalk, clay, dolomite and tripoli powder) and wastewater electric coagulation treatment sludge are of low efficiency.

Results for experiments with synthetic solutions of phosphates are in correlation with results for actual wastewaters.

Key words: eutrophication, phosphates, wastewater treatment, industrial wastes.

Введение. На протяжении последних нескольких десятилетий значительное внимание уделяется вопросу снижения поступления соединений фосфора в водные объекты. Это имеет большое значение для управления процессом антропогенной эвтрофикации, так как фосфор играет

ключевую роль в увеличении численности организмов низших трофических уровней водных экосистем – бактерий, водорослей и др. [1]. Избыточное поступление соединений фосфора в экосистемы приводит к повышению их трофического статуса по отношению к естественному.

При этом нарушается сложившаяся система пищевых отношений и возникает новая, возрастает первичная биопродукция (трофность) и биогенная миграция. Рост трофности приводит к «цветению» воды в период вегетации, что неблагоприятно сказывается на состоянии водного объекта и он становится непригодным для большинства вариантов природопользования [2].

Поступление фосфора в водные объекты обусловлено сбросом сточных вод и поверхностного стока с урбанизированных и сельскохозяйственных территорий [3]. Регулирование поступления фосфора может осуществляться сбалансированным применением минеральных удобрений и очисткой сточных вод от фосфора до безопасного для экосистем уровня.

В очистке сточных вод от фосфора распространение получили следующие способы: биологическая дефосфотация фосфораккумулирующими организмами, химическое осаждение соединений фосфора в виде малорастворимых соединений и сорбция с использованием материалов с высоким потенциалом удаления фосфатов.

Первые два способа наиболее целесообразно использовать на очистных сооружениях канализации производительностью по показателю эквивалентного населения (ЭН) более 10 000. В Республике Беларусь допустимые концентрации общего фосфора установлены в зависимости от массы органических веществ, поступающих со сточными водами, и составляют 4,5 и 2,0 мг/дм³ для очистных сооружений, у которых ЭН находится в пределах 10 001–100 000 и более 100 001 соответственно. Для очистных сооружений со значением показателя ЭН менее 10 001 общий фосфор не нормируется [4]. Однако неконтролируемый сброс фосфорсодержащих сточных вод от малых очистных сооружений в пределах водосборных бассейнов водных объектов может привести к превышению предельно допустимой концентрации фосфатов (ПДК – 0,066 мг P/дм³).

Для очистных сооружений малой производительности использование реагентной или биологической очистки ограничено высокими капитальными и эксплуатационными затратами, сложностью реализации и управления. Поэтому исследования в данной области сконцентрированы на поиске недорогих доступных фильтрационных материалов и оценке их способности удалять фосфаты из сточных вод. Исследован широкий спектр материалов, включая горные породы, отходы производства и промышленные сорбенты [5], которые классифицируют по происхождению и сорбционной емкости [6]. В соответствии с происхождением сорбенты разделяют на природные, отходы производства и искусственные. По сорбцион-

ной емкости (мг PO₄³⁻/г) они классифицируются на материалы с очень низкой (менее 0,3), низкой (0,3–1,5), средней (1,5–3,1), высокой (3,1–30,6) и очень высокой (более 30,6) емкостью по фосфатам [6].

Известно использование следующих природных материалов для очистки сточных вод от фосфатов: гранулированной бентонитовой глины [7], арагонита, клиноптилолита, монтмориллонита, известняка-ракушечника [8], доломита [9], волластонита [10]. Проведены исследования отхода промышленности – доменного шлака [11], промышленных сорбентов – Polonite® [12], Filtra P® [13], Filtralite P® [14].

Целью данной работы было оценить возможность использования для очистки сточных вод от фосфатов материалов на основе природного сырья и отходов.

Основная часть. В качестве объекта исследования были выбраны доступные в Беларуси материалы и сорбенты с высоким содержанием соединений Al, Fe, Ca и Mg. Использованы три группы материалов – природное сырье, отходы производства и промышленные сорбенты. Они представлены легкоплавкой глиной, трепелом, доломитом, мелом, отработанным катализатором крекинга, электросталеплавильным шлаком, осадками очистных сооружений промышленных предприятий и промышленным сорбентом Polonite®. Оксидный состав использованных материалов приведен в табл. 1.

Легкоплавкая глина – горная порода, состоящая из одного или нескольких минералов группы алюмосиликатов. По размеру частиц к глинам принадлежат породы, состоящие более чем на 50% (здесь и далее мас. %) из частиц до 0,01 мм. В работе использовали глину месторождения «Лукомль-1» (Витебская область), относящуюся к гидрослюдисто-каолининовой группе с высоким содержанием железа [15].

Трепел месторождения «Стальное» Могилевской области представляет собой горную породу, особенностью которой является содержание цеолитов до 30% [16].

Мел – мономинеральная порода биохимического происхождения, основной компонент которой CaCO₃. В работе использовали мел Волковыского месторождения (Гродненская область) [17].

В работе применялся доломит месторождения Руба (Витебская область). Соотношение по массе CaO : MgO = 1,46. Объемная масса доломита составляет 2000–2800 кг/м³ [17].

Отработанный катализатор крекинга углеводородов нефти (ОКК) – отход четвертого класса опасности [18], который образуется на ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод». ОКК представляет собой мелкодисперсный

порошок серого цвета. ОКК образуется при периодической замене катализатора крекинга (партия-1) и разрушении частиц катализатора, уловленных на электрофильтре (партия-2). Размер частиц партии-1 составляет 10–100 мкм, для партии-2 – 5–20 мкм. Активным компонентом ОКК является цеолит, содержание которого составляет до 40% [19].

Электросталеплавильный шлак (ЭСПШ) ОАО «Белорусского металлургического завода» (БМЗ) – побочный продукт производства стали, который относится к отходам четвертого класса опасности [18].

Шлам водоподготовки – отход четвертого класса опасности [18], образующийся на Минской ТЭЦ-3 в процессе реагентного умягчения воды.

Осадки электрокоагуляционной очистки сточных вод ОАО «Белкард», ОАО «Гродно-торгмаш» и РУП «Могилевский металлургический завод» (ММЗ) представляют собой отходы, образующиеся в результате очистки сточных вод гальванического производства [19], которые относятся к третьему классу опасности [18].

Polonite® – промышленный сорбент, получаемый путем обжига при 900°C и последующего дробления известкового минерала – опоки [12, 21].

Растворы фосфатов готовили с использованием однозамещенного фосфата калия и 0,01 М КСl. Значение pH корректировали до значения $7,0 \pm 0,5$ растворами 0,01 М КОН и НСl.

Определение влияния удельного расхода материалов на степень очистки от фосфатов проводилось на растворах фосфатов концентрацией 100 мг $\text{PO}_4^{3-}/\text{дм}^3$. Навеску мелкодисперсного материала (размерами частиц не более 0,25 мм), высушенного до влажности не более 1%, дозировали в раствор, и выдерживали при периодическом перемешивании два часа. Затем сорбент отделяли на бумажном фильтре «белая» лента. В фильтрате определяли остаточное содержание фосфатов.

При использовании образцов доломита, полученных в результате термической обработки в течение одного часа при температурах от 200 до 700°C с шагом 100°C, навеску материала дозировали в раствор фосфатов с концентрацией 100 мг $\text{PO}_4^{3-}/\text{дм}^3$ и выдерживали в течение одного часа при постоянном перемешивании. После этого пробу фильтровали, в фильтрате определяли остаточное содержание фосфатов и значение pH.

Таблица 1

Усредненный оксидный состав исследуемых материалов, мас. %

Оксиды	Глина [15]	Трепел [16]	Мел [17]	Доломит*	Доломит, термообработанный при 700°C*	ОКК [19]	ЭСПШ «БМЗ»*	Шлам «ТЭЦ-3»*	Осадок «Белкард» [20]	Осадок «Гродно-торгмаш» [20]	Осадок «ММЗ» [20]	Polonite [12]
CaO	4,3	21,0	54,3	30,0	37,3	–	53,3	69,7	5,0	3,9	0,7	25,1
FeO	7,5	1,7	0,1	0,4	1,5	–	8,0	16,2	47,6	30,4	77,0	2,7
Al ₂ O ₃	13,2	7,6	0,6	0,3	1,8	51,4	5,5	–	0,5	4,8	0,7	5,3
MgO	2,5	2,5	0,6	21,0	27,1	–	2,6	8,4	–	0,4	0,5	0,8
SiO ₂	65,1	64,6	1,2	1,7	5,7	45,3	20,2	5,7	2,7	–	6,4	60,1
Cr ₂ O ₃	–	–	–	–	–	–	–	–	15,1	5,9	2,7	–
MnO	–	–	–	–	–	–	3,0	–	–	–	5,9	–
SO ₃	–	0,1	–	–	–	–	1,7	–	1,9	0,8	0,2	–
K ₂ O	0,8	1,3	0,2	0,7	1,0	–	–	–	–	0,2	–	1,0
Na ₂ O	1,2	1,0	0,1	1,0	1,5	0,9	–	–	–	5,1	–	0,2
TiO ₂	0,3	0,2	–	–	–	–	–	–	0,4	0,6	–	0,3
ZnO	–	–	–	–	–	–	2,5	–	4,8	4,8	–	–
P ₂ O ₅	–	–	–	–	–	–	–	–	3,2	30,6	–	1,0
La ₂ O ₃	–	–	–	–	–	2,1	–	–	–	–	–	–
CO ₂	5,1	–	42,9	44,9	24,1	–	3,2	–	18,8	12,5	5,9	–

* Элементный анализ проводили на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610 LV с системой химического анализа EDX JED-2201.

Для характеристики эффективности использования материалов определяли емкость по фосфатам. За емкость принимали количество фосфатов, удаляемое из раствора на единицу массы материала. Исследование емкости материалов по фосфатам проводили в закрытых непрозрачных полиэтиленовых емкостях. В растворы с различными концентрациями фосфатов в диапазоне 1–300 мг $\text{PO}_4^{3-}/\text{дм}^3$ дозировали исследуемый материал. Пробы выдерживали при температуре $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$, постоянно перемешивая в течение двух суток. Оработанный сорбент отделяли фильтрованием. В фильтрате определяли остаточное содержание фосфатов. Экспериментальные данные аппроксимировали с помощью уравнения Ленгмюра [6]:

$$A = A_\infty \frac{K_L \cdot C_p}{1 + K_L \cdot C_p}, \quad (1)$$

где A , A_∞ – значения емкости по фосфатам и максимальной емкости по фосфатам соответственно, мг $\text{PO}_4^{3-}/\text{г}$; K_L – константа равновесия; C_p – равновесная концентрация фосфатов в растворе, мг $\text{PO}_4^{3-}/\text{дм}^3$.

Значение A , мг $\text{PO}_4^{3-}/\text{г}$, материала определяли по формуле (2):

$$A = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{ост}}) \cdot V}{m}, \quad (2)$$

где $C_{\text{исх}}$, $C_{\text{ост}}$ – исходная и остаточная концентрация фосфатов в растворе, мг $\text{PO}_4^{3-}/\text{дм}^3$; V – объем пробы, дм^3 ; m – масса навески материала, г.

Коэффициент распределения фосфатов определяли по формуле (3):

$$K_p = \frac{A_{\text{макс}}}{C_p}, \quad (3)$$

где $A_{\text{макс}}$ – максимальная емкость по фосфатам, мг $\text{PO}_4^{3-}/\text{г}$; C_p – равновесная концентрация фосфатов, мг $\text{PO}_4^{3-}/\text{дм}^3$.

Концентрацию фосфатов определяли фотометрическим методом [22], рН – потенциометрическим методом [23].

Для предварительной оценки эффективности использования выбранных материалов были проведены эксперименты по определению влияния удельного расхода материалов на степень очистки от фосфатов растворов с концентрацией 100 мг $\text{PO}_4^{3-}/\text{дм}^3$. Результаты экспериментов представлены на рис. 1.

Из всех испытанных материалов наименьшая степень удаления фосфатов в условиях эксперимента достигнута при использовании необработанного природного сырья (рис. 1, а).

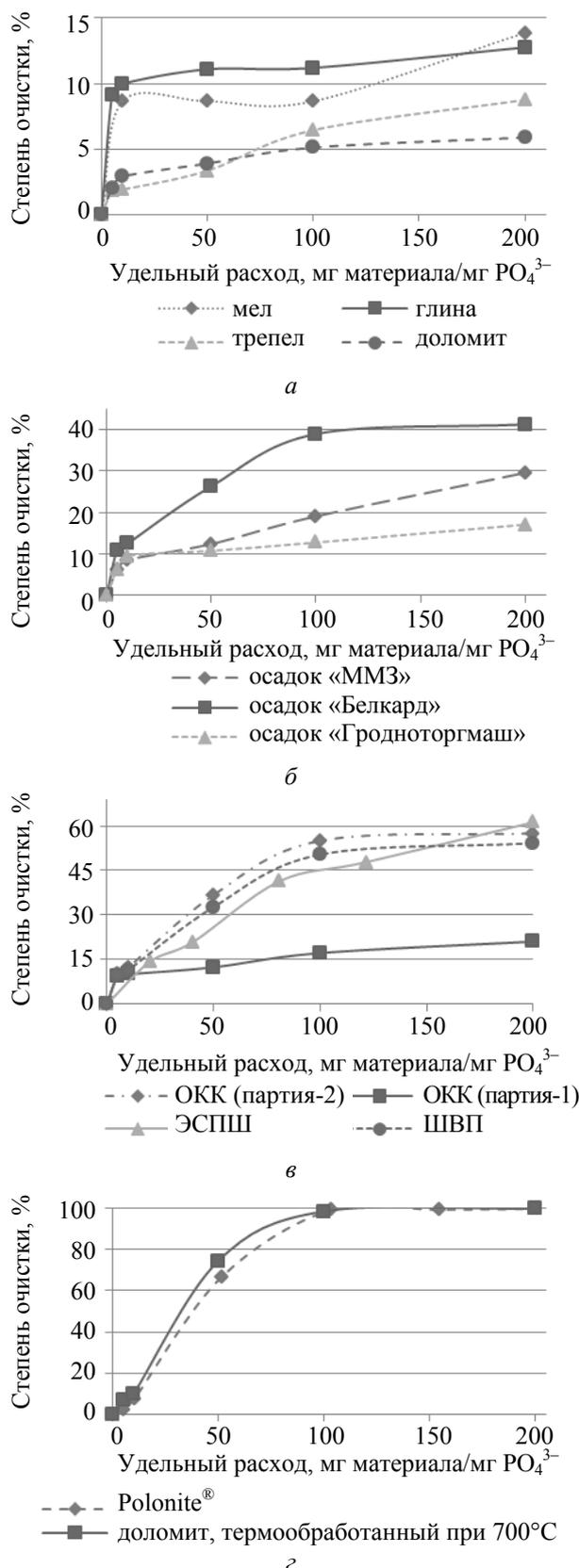


Рис. 1. Зависимость степени очистки по фосфатам от расхода материала: а – природное сырье; б – осадки электрокоагуляционной очистки сточных вод; в – отходы производств и водоподготовки; г – Polonite® и доломит, термообработанный при 700°C

Удаление фосфатов в данном случае, вероятно, основано на физической сорбции поверхностью материалов. Максимальная степень очистки от фосфатов не превышала 15%. В порядке уменьшения степени очистки при удельном расходе 200 мг материала/мг PO_4^{3-} природное сырье располагается в следующей последовательности: мел, легкоплавкая глина, трепел и доломит.

Известно, что термическая обработка природных материалов приводит к увеличению их сорбционной способности по отношению к фосфатам [21]. Для исследования влияния условий термической обработки на степень очистки от фосфатов среди испытанных горных пород был выбран доломит, термическая активация которого требует меньших энергетических затрат [23]. Кроме того, данное сырье является доступным по стоимостным характеристикам.

Результаты использования доломита, подвергнутого термической обработке, для удаления фосфатов приведены на рис. 2.

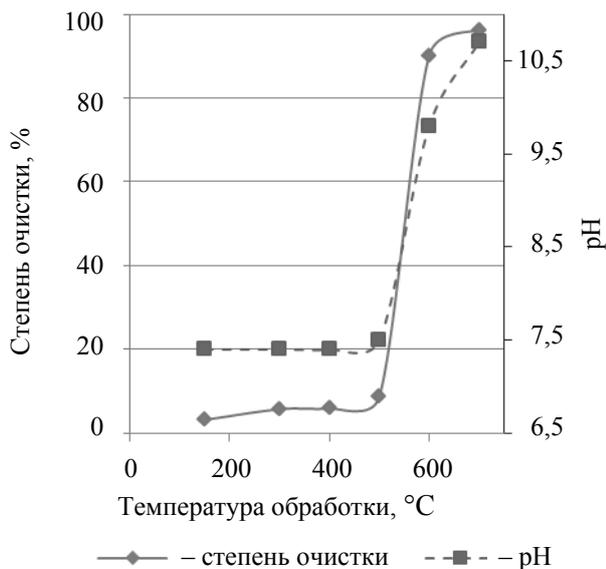


Рис. 2. Влияние температурной обработки доломита на способность удалять фосфаты

Из рис. 2 следует, что при увеличении температуры термообработки от 500°C до 700°C происходит увеличение степени очистки с 5,6% до 96,4% и рост значения pH растворов от 7,3 до 10,3. Это объясняется тем, что при температуре 650°C имеет место разложение карбоната магния [24], в результате образующийся оксид магния связывает фосфаты на поверхности обожженного доломита. Очевидно, это говорит о том, что в данном случае в основе процесса удаления фосфатов лежит образование малорастворимого фосфата магния.

Более эффективно удаление фосфатов протекало с использованием осадков электрокоагуляционной очистки сточных вод (рис. 1, б). Максимальная степень очистки для осадков ОАО «Белкард», ОАО «ММЗ» и ОАО «Гродно-торгмаш» соответственно равна 17%, 30% и 42%.

На рис. 1, в представлены результаты удаления фосфатов с использованием отходов, образующихся в сталеплавильном производстве, нефтепереработке и водоподготовке. Установлено, что данные материалы при максимальном удельном расходе 200 мг материала/мг PO_4^{3-} имеют близкие значения степени очистки. Эффективность удаления фосфатов при их использовании находится в диапазоне 54,2–61,3%. Исключение составляет ОКК партии-1, степень очистки для которого достигла лишь 21%. Из чего можно сделать вывод, что на степень очистки при использовании ОКК оказывает влияние дисперсный состав частиц.

Наилучшие результаты по удалению фосфатов достигнуты с использованием промышленного сорбента Polonite и доломита, термически обработанного при 700°C (рис. 1, з). Применение данных материалов при удельном расходе 100 мг материала/мг PO_4^{3-} обеспечивает удаление не менее 98,5% исходного количества фосфатов. Дальнейшее увеличение удельного расхода приводит к повышению степени очистки до 99,8%. Наличие в составе Polonite® и термически обработанного доломита свободных оксидов кальция и магния позволяет предположить, что имеет место один и тот же механизм удаления фосфатов – химическое связывание в труднорастворимые фосфаты кальция и магния соответственно.

Известно, что наиболее важными параметрами, характеризующими эффективности сорбционных материалов и используемых для определения оптимальных условий ведения процесса, является предельная сорбционная емкость и коэффициент распределения [25]. В работе эти показатели использовали для сравнения исследуемых материалов по способности удалять фосфаты из растворов.

Для дальнейшего исследования были отобраны материалы, использование которых обеспечило наибольшую степень очистки: термически обработанный при 700°C доломит, ШВП, ЭСПШ и ОКК (партия-2).

Оценку способности удалять фосфаты проводили путем определения максимальной емкости материалов по фосфатам, которую рассчитывали на основе изотерм сорбции, представленных на рис. 3.

Константы уравнений Ленгмюра, использованные для аппроксимации экспериментальных

данных, и коэффициенты распределения фосфатов представлены в табл. 2. Для сравнения в таблице приведена максимальная емкость по фосфатам для Polonite® [21].

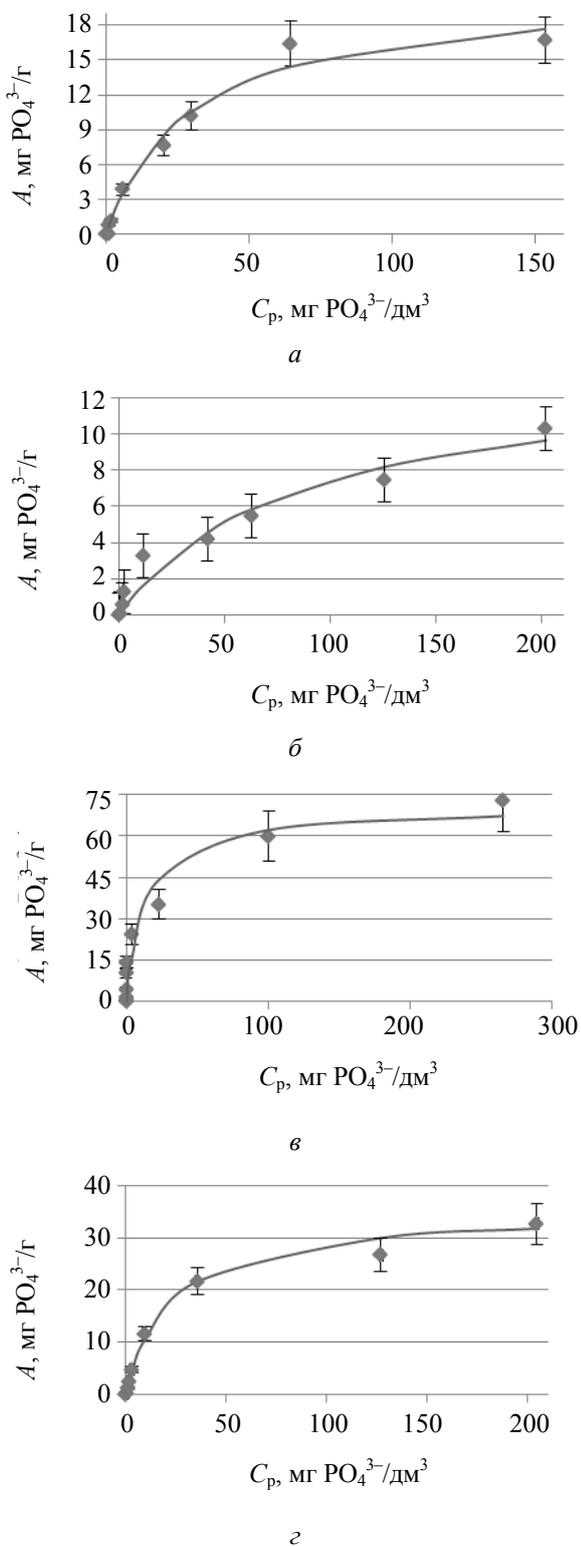


Рис. 3. Зависимость емкости материалов по фосфатам от равновесной концентрации в растворе: а – ОКК (партия-2); б – ШВП; в – доломит, термообработанный при 700°C; з – ЭСПШ

Таблица 2

Параметры исследованных материалов

Материал	$A_{\text{макс}}$, мг/г	K_L , дм ³ /мг	R^2	K_p , г/г
ШВП	13,6	0,012	0,961	51,1
ОКК (партия-2)	21,2	0,033	0,982	109,2
ЭСПШ	35,3	0,045	0,990	159,8
Доломит, термообр. при 700°C	70,8	0,072	0,946	273,3
Polonite®	119	–	–	–

Данные, представленные на рис. 3 и в табл. 2, хорошо описываются уравнением Ленгмюра, что подтверждает химическую природу процессов, лежащих в основе удаления фосфатов [6]. По мнению авторов [5, 12, 26], основными путями удаления фосфатов с использованием исследуемых материалов являются взаимодействие фосфатов с ионами Al, Fe, Ca, Mg; ионный обмен; взаимодействие с гидроксидами Ca и Mg и фиксация алюмосиликатами. На основе данных о составе исследуемых материалов можно предположить, что для термически обработанного доломита, ШВП и ЭСПШ главным механизмом удаления фосфатов является образование фосфатов магния и кальция, тогда как для ОКК преобладает ионный обмен и фиксация алюмосиликатами.

Исследованные материалы обладают меньшей сорбционной емкостью, нежели промышленный сорбент. Тем не менее, в соответствии с классификацией, представленной выше, термообработанный доломит и ЭСПШ относятся к материалам с очень высокой, а ОКК и ШВП с высокой сорбционной емкостью по фосфатам.

Результаты испытаний материалов, полученные на растворах фосфатов, использовались для определения доз при очистке иловой воды Минской очистной станции. Концентрация фосфатов в иловой воде находилась в диапазоне 60–350 мг $\text{PO}_4^{3-}/\text{дм}^3$. Применение термообработанного доломита, ОКК и ЭСПШ при расходе 13,6 кг/м³ позволяет достичь степени очистки 95%, 74% и 51% соответственно. После использования данных материалов для удаления фосфатов из сточных вод, они могут найти применение в качестве почвенных мелиорантов.

Выводы. Проведенные лабораторные исследования термически обработанного при 700°C доломита, ШВП, ЭСПШ и ОКК (партия-2) позволяют сделать вывод об их возможном применении для очистки сточных вод и поверхностного стока с сельхозугодий и могут быть использованы в качестве фильтрующей загрузки и субстрата биогеохимических барьеров, полей фильтрации, гидрботанических площадок и пр.

Литература

1. Smith V. H., Tilman G. D., Nekola J. C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems // *Environmental pollution*. 1999. Vol. 100. No. 1. P. 179–196.
2. Сапунов В. Б. Динамика биогенов, биомассы и биоразнообразия в ходе процесса эвтрофикации: материалы Междунар. конф. «Экология водных беспозвоночных», посвящ. 100-летию со дня рождения Ф. Д. Мордухай-Болтовского. Ярославль, 2010. С. 277–289.
3. Бутько А. А., Родькин О. И. Прогнозирование поступления фосфора в водные объекты с территории агроландшафтов // *Экологический вестник*. 2012. № 2. С. 76–83.
4. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Порядок установления нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Парадак устанавлення нарматываў дапушчальных скідаў хімічных і іншых рэчываў у складзе сцэкавых вод: ТКП 17.06-08-2012 (02120). Введ. 01.01.2012. Минск: Минприроды, 2012. 73 с.
5. Vohla C. Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetland // *Ecological Engineering*. 2011. Vol. 37. No. 1. P. 70–89.
6. Cucarella V., Renman G. Phosphorus sorption capacity of filter materials used for on-site wastewater treatment determined in batch experiments. A comparative study // *Environ. Qual.* 2009. No. 38. P. 381–392.
7. Айменова Г. К., Шакиров Б. С. Очистка фосфатсодержащих сточных вод местными сорбентами // *Региональная экология*. 2003. № 1–2. С. 68–70.
8. Дефосфотизация биологически очищенных сточных вод // *Медиана-эко: очистка промышленных стоков* [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.mediana-eco.ru/information/stoki_biological/fosfor. Дата доступа: 17.12.2014.
9. Karaca S. Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of phosphate on dolomite // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 277. No. 2. P. 257–263.
10. Brooks A. S. Phosphorus removal by wollastonite: A constructed wetland substrate // *Ecological Engineering*. 2000. Vol. 15. No. 1. P. 121–132.
11. Morse G. K. Review: phosphorus removal and recovery technologies // *Science of the total environment*. 1998. Vol. 212. No. 1. P. 69–81.
12. Renman A. On-site wastewater treatment – Polonite and other filter materials for removal of metals, nitrogen and phosphorus // *Doctoral Thesis in Land and Water Resources Engineering, KTH Architecture and the Built Environment*. 2008. 48 p.
13. Herrmann I. Phosphorus binding to Filtra P in batch tests // *Environmental technology*. 2012. Vol. 33. No. 9. P. 1013–1019.
14. Adam K. Phosphorus retention in the filter materials shellsand and Filtralite P[®] – Batch and column experiment with synthetic P solution and secondary wastewater // *Ecological Engineering*. 2007. Vol. 29. No. 2. P. 200–208.
15. Терещенко И. М. Использование нетрадиционных сырьевых материалов для получения термостойкой керамики // *Стекло и керамика*. 2009. № 4. С. 14–16.
16. Месторождение известковых трепелов «Стальное» Хотимский район. Могилевская область // Республиканское унитарное предприятие «Белорусский научно-исследовательский геологоразведочный институт» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://geology.org.by/index.php/proekty-porazrobotke-mestorozhdeniy/trepel>. Дата доступа: 18.01.2015
17. Полезные ископаемые Беларуси: к 75-летию БелНИГРИ / редкол. Хомич П. З. Минск. Адукацыя і выхаванне. 2002. 528 с.
18. Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь : утвержден постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 8 ноября 2007 г. № 85. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://minpriroda.gov.by/uploads/folderForLinks/000116_964480.docx.
19. Козловская И. Ю., Марцуль В. Н. Свойства отработанного катализатора каталитического крекинга и возможности его применения для сорбционной очистки сточных вод // *Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорган. в-в*. 2010. Вып. XVIII. С. 127–130.
20. Марцуль В. Н. Элементный состав и фазовый состав гальванических шламов, осадков очистных сооружений машиностроительных и приборостроительных предприятий Республики Беларусь // *Природные ресурсы: межвед. науч.-практ. бюл.* 2013. № 1. С. 113–118.
21. Brogowski Z., Renman G. Characterization of opoka as a basis for its use in wastewater treatment // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2004. Vol. 13. No. 1. P. 15–20.

22. ISO Standard 6878:2004 Water Quality – Determination of phosphorus – Ammonium molybdate spectrographic method, International Organisation for Standardization, Geneva. Switzerland, 2004.
23. ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений рН в водах потенциометрическим методом. Введ.: 21.03.1997. 14 с.
24. Химическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1992. Т. 2. С. 323.
25. Величко Б. А., Венсковский Н. У. Био- и фитосорбенты тяжелых металлов. М.: Российский университет дружбы народов, 2001. 78 с.
26. Leader, J. W. Dunne E. J., Reddy K. R. Phosphorus sorbing materials: sorption dynamics and physicochemical characteristics // *Journal of environmental quality*. 2008. Vol. 37. No 1. P. 174–181.

References

1. Smith V. H., Tilman G. D., Nekola J. C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental pollution*, 1999, vol. 100, no. 1, pp. 179–196. DOI:10.1016/S0269-7491(99)00091-3.
2. Sapunov V. B. [Dynamics of nutrients, biomass and biodiversity in the process of eutrophication]. *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya F. D. Mordukhay-Boltovskogo* [Materials of the International Conference, dedicated to the 100th anniversary of F. D. Mordukhay-Boltovskogo]. Yaroslavl', 2010, pp. 277–289.
3. But'ko A. A., Rod'kin O. I. Prediction of phosphorus in water bodies from the territory of agricultural landscapes. *Ekologicheskiiy vestnik* [Ecological bulletin], 2012, no. 2, pp. 76–83 (in Russian).
4. ТКР 17.06-08-2012 (02120). Protection of the environment and natural resources. Hydrosphere. The procedure for establishing standards for allowable discharges of chemicals and other substances in wastewater. Minsk, Ministry of Natural Resources Publ., 2012. 73 p.
5. Vohla C. Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 2011, vol. 37, no. 1, pp. 70–89. DOI:10.1016/j.ecoleng.2009.08.003.
6. Cucarella V., Renman G. Phosphorus sorption capacity of filter materials used for on-site wastewater treatment determined in batch experiments. A comparative study. *Environ. Qual*, 2009, no. 38, pp. 381–392. DOI: 10.2134/jeq2008.0192.
7. Aymenova G. K., Shakirov B. S. Cleaning phosphate wastewater local sorbents. *Regional'naya ekologiya* [Regional ecology], 2003, no. 1–2, pp. 68–70 (in Russian).
8. Defosfotizatsiya biologicheskii ochishchennykh stochnykh vod [Dephosphorizing biologically treated wastewater]. Available at: http://www.mediana-eco.ru/information/stoki_biological/fosfor. (accessed 17.12.2014).
9. Karaca S. Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of phosphate on dolomite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, vol. 277, no. 2, pp. 257–263. DOI:10.1016/j.jcis.2004.04.042.
10. Brooks A. S. Phosphorus removal by wollastonite: A constructed wetland substrate. *Ecological Engineering*, 2000, vol. 15, no. 1, pp. 121–132. DOI:10.1016/S0925-8574(99)00056-7.
11. Morse G. K. et al. Review: phosphorus removal and recovery technologies. *Science of the total environment*, 1998, vol. 212, no. 1, pp. 69–81. DOI:10.1016/S0048-9697(97)00332-X.
12. Renman A. On-site wastewater treatment – Polonite and other filter materials for removal of metals, nitrogen and phosphorus. *Doctoral Thesis in Land and Water Resources Engineering, KTH Architecture and the Built Environment*, 2008, 48 p.
13. Herrmann I. Phosphorus binding to Filtra P in batch tests. *Environmental technology*, 2012, vol. 33, no. 9, pp. 1013–1019. DOI:10.1080/09593330.2011.604878.
14. Adam K. Phosphorus retention in the filter materials shellsand and Filtralite P[®] – Batch and column experiment with synthetic P solution and secondary wastewater. *Ecological Engineering*, 2007, vol. 29, №. 2, pp. 200–208. DOI:10.1016/j.ecoleng.2006.09.021.
15. Tereshchenko I. M. Using of nontraditional raw materials for production of heat-resistant ceramics. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics], 2009, no. 4, pp. 14–16 (in Russian).
16. Mestorozhdenie izvestkovykh trepelov «Stal'noe». Khotimskiy rayon. Mogilevskaya oblast' [Lime tripoli deposit «Stal'noe» in Khotimsky district from Mogilev region] Available at: <http://geology.org.by/index.php/proekty-po-razrabotke-mestorozhdeniy/trepel>. (accessed 17.12.2014).
17. *Poleznye iskopaemye Belarusi: k 75-letiyu BelNIGRI* [Belarusian natural resources: for the 75th anniversary]. Edit by Khomich P. Z. Minsk, Adukacyja i vyhavanne Publ., 2002. 528 p.
18. Klassifikator otkhodov, obrazuyushchikhsya v Respublike Belarus [Qualifier waste generated in the Republic of Belarus]. Available at: http://minpriroda.gov.by/uploads/folderForLinks/000116_964480.docx. (accessed 01.02.2015).

19. Kozlovskaya I. Y., Martsul V. N. Properties dead catalytic cracking catalyst and the possibility of its application for sorption wastewater. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series III, Chemistry and technology of inorganic substances, 2010, issue XVIII, pp. 127–130 (in Russian).

20. Martsul V. N. The elemental composition and phase composition of electroplating sludge, sediment treatment facilities engineering and instrument-making enterprises of the Republic of Belarus. *Prirodnye resursy* [Natural resources], 2013, no. 1, pp. 113–118 (in Russian).

21. Brogowski Z., Renman G. Characterization of opoka as a basis for its use in wastewater treatment. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2004, vol. 13, no. 1, pp. 15–20. ScopusID: 2-s2.0-1842537986&

22. ISO Standard 6878:2004 Water Quality – Determination of phosphorus – Ammonium molybdate spectrographic method, International Organisation for Standardization. Geneva, Switzerland, 2004.

23. PND F 14.1:2:3:4.121-97. Quantitative chemical analysis of water. Methods of measurement of pH in the waters of the potentiometric method. Moscow, 1997, 14 p (in Russian).

24. *Khimicheskaya entsiklopediya* [Chemical Encyclopedia]. Moscow, Soviet Encyclopedia Publ., 1992, vol. 2. P. 323.

25. Velichko B. A., Venskovskiy N. U. *Bio- i fitosorbenty tyazhelykh metallov* [Bio- and phytosorbents of heavy metals]. Moscow, Rossiyskiy universitet druzhby narodov Publ., 2001, 78 p.

26. Leader J. W., Dunne E. J., Reddy K. R. Phosphorus sorbing materials: sorption dynamics and physicochemical characteristics. *Journal of environmental quality*, 2008, vol. 37, no. 1, pp. 174–181. DOI:10.2134/jeq2007.0148.

Информация об авторах

Сапон Егор Геннадьевич – аспирант кафедры промышленной экологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: sapon@belstu.by

Марцунь Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленной экологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: martsul@belstu.by

Information about the authors

Sapon Yegor Gennad'yevich – Ph. D. Student, Department of Industrial Ecology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sapon@belstu.by

Martsul Vladimir Nikolaevich – Ph. D. Engineering, assistant professor, professor, Department of Industrial Ecology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: martsul@belstu.by

Поступила 18.02.2015