

УДК628.316:54:666.962.3

Е. Г. Сапон, В. Н. Марцунь

Белорусский государственный технологический университет

**ОЧИСТКА ВОЗВРАТНЫХ ПОТОКОВ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ
ОТ ФОСФАТОВ ОБОЖЖЕННЫМ ДОЛОМИТОМ**

Сокращение запасов разведанного фосфорсодержащего сырья и борьба с эвтрофикацией водных объектов являются хорошими стимулами для разработки способов извлечения фосфатов на очистных сооружениях канализации. В работе определены потоки очистных сооружений, из которых фосфор может быть извлечен в доступной для последующего использования форме.

Показано, что обожженный доломит является материалом, обеспечивающим эффективное извлечение фосфатов. При его использовании для очистки фугата и иловой воды максимальная степень удаления фосфатов составляла 99,8%. Степень очистки от фосфатов зависит от дисперсности и активности материала.

Исследованы кинетика удаления фосфатов и варианты интенсификации процесса. Установлено, что в наибольшей степени интенсифицирует процесс удаления фосфатов ультразвуковая обработка, при использовании которой за 15 мин степень очистки превысила 85%. Аэрация суспензии обожженного доломита в очищаемой жидкости позволяет за 30 мин. достигнуть 95%-ной степени очистки.

Определены условия отделения отработанного материала, его влажность, химический и фазовый состав. Влажность отработанного материала составляет 91%, содержание фосфора в сухом веществе достигает 2,16 мас. %. На основе рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопии установлено, что в результате протекающих химических реакций образуются магний-аммоний фосфат, фосфат магния и брусит.

Исходя из результатов проведенных исследований предложена принципиальная схема удаления фосфатов из потоков, образующихся при обработке осадков сточных вод, на основе применения обожженного доломита. Реализация данной технологии позволит извлечь до 20% фосфора, поступающего на очистные сооружения, и использовать его в составе отработанного обожженного доломита в качестве почвоулучшающей добавки.

Ключевые слова: фосфаты, иловая вода, фугат, обожженный доломит.

Ye. G. Sapon, V. N. Martsul

Belarusian State Technological University

**THE PHOSPHATES REMOVAL FROM SIDE-STREAMS
OF WASTEWATER TREATMENT PLANTS BY BURNED DOLOMITE**

Reducing reserves of phosphorus raw materials and control of eutrophication of water bodies are good incentives for the development of methods for phosphates recovery on sewage treatment plants. The article presents side-streams of wastewater treatment plant, from which phosphorus can be recovered in an accessible for future use form.

It is shown that the burned dolomite provides effective removal of phosphates. The highest degree up to 99.8% of phosphates purification from supernatant water and sludge was achieved. The degree of purification depends on particle sizes and activity of the material.

The kinetic of phosphates removal from side-streams of wastewater treatment plant and techniques for process intensification were investigated. It is established, that ultrasound treatment provides the highest most intensity of the process, after 15-minute applying the purification degree was greater than 85%. Aeration of suspension «burned dolomite – treatment water» allows to achieve the purification degree up to 95% in 30 minutes.

The conditions of separation, humidity, chemical and phase composition of the waste material were investigated. Humidity up to 91 wt. %, the phosphorus content up to 2.16 dry wt. % were observed. Using X-ray diffraction techniques and FTIR spectroscopy it was found that magnesium ammonium phosphate, magnesium phosphate and brushite are results of occurring chemical reactions.

Based on this study process flow scheme of phosphates removal from streams obtained during sludge treatment applying burned dolomite was suggested. The implementation of this technology make it possible to remove up to 20% of phosphorus entering to wastewater treatment plant, and use it as a soil additive.

Key words: phosphates, sludge water, supernatant water, burned dolomite.

Введение. Отведение недостаточно очищенных от фосфатов сточных вод приводит к эвтрофикации водных объектов, которая является причиной избыточного роста водорослей и нарушения функционирования естественных экосистем [1, 2]. Особенно чувствительны к ним водные объекты с замедленным водообменом – озера, водохранилища. С позиции защиты рек и водоемов Беларуси от эвтрофирования содержание фосфатов, не превышающее 0,030 мг Р/л, характеризует состояние водных экосистем как благополучное [3, 4]. По результатам мониторинга поверхностных вод за 2010–2015 годы, как правило, среднегодовые концентрации фосфора для основных водных бассейнов превышали указанное выше значение. Например, в 2014 г. в 24% отобранных проб воды в реке Неман регистрировались концентрации фосфат-иона, превышающие ПДК_{р,х} (0,066 мг Р/л) [5].

К негативным последствиям сброса фосфора со сточными водами также следует отнести то, что он практически полностью выводится из хозяйственного оборота. Ежедневно в результате жизнедеятельности одного человека в сточные воды поступает до 1,2 г фосфора. При численности человечества в 7 млрд. фосфорная нагрузка на мировой океан составляет 3 млн. т./год, или 15% от добываемого количества [6]. Вместе с тем фосфор относится к исчерпаемым ресурсам и при сохранении существующих темпов добычи и использования его разведанных запасов хватит не более чем на 125 лет [7, 8]. При этом качество фосфорсодержащего сырья и его доступность будут ухудшаться, что неизбежно приведет к увеличению затрат на его добычу, обогащение, транспортировку и др. Все это является хорошим стимулом для поиска новых источников удовлетворения потребности в фосфоре. Одним из них являются коммунальные сточные воды [8]. Фосфор может быть извлечен из сточных вод, избыточного активного ила, золы от сжигания осадков сточных вод, возвратных потоков, образующихся на очистных сооружениях в результате обработки осадков сточных вод. Качество получаемых фосфорсодержащих продуктов зависит от применяемых технологий извлечения и состава сточных вод. Так, ограничивающим фактором их использования может быть совместный сброс на очистные сооружения промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод [8].

Значительный вклад в общую нагрузку фосфора на сооружения биологической очистки вносит возврат иловой воды из уплотнителей и иловых площадок, аэробной и анаэробной стабилизации и фугата обезвоживания осадков сточных вод (возвратных потоков) в приемную камеру очистных сооружений. В этих потоках

может содержаться до 60% фосфора, связанного на стадии биологической очистки [9]. Концентрация фосфора в них может достигать 200 мг Р/л, что в 20 раз больше, чем в поступающих на очистку сточных водах [9, 11].

Наиболее широко применяемым методом очистки сточных вод от фосфатов является использование коагулянтов, как правило, солей железа и алюминия. Однако в этом случае фосфор удаляется из сточных вод в составе осадков в форме, практически не доступной для растений.

На сегодняшний день реализовано несколько технологий, позволяющих извлекать фосфор из возвратных потоков очистных сооружений в доступном для последующего сельскохозяйственного использования. В США, Канаде и Японии внедрены установки, обеспечивающие связывание фосфатов в виде гранул, состоящих из кристаллов магний-аммоний фосфата, фосфатов кальция и магния [8, 9]. В основе применяемых технологий лежит использование таких реагентов, как известковое молоко, гидроксид магния, смесь гидроксида натрия и хлорида магния.

Наряду с кристаллизацией высокоэффективным методом очистки сточных вод от фосфатов является сорбция. Перспективно использование местных материалов, обладающих высоким потенциалом удаления фосфора и доступностью. Ранее нами показано, что для эффективного удаления фосфатов из возвратных потоков очистных сооружений может быть использован обожженный доломит (температура обжига 600–750°C) [10, 11]. Фазовый состав материала характеризуется наличием карбонатов кальция и магния и оксида магния. Основным механизмом извлечения фосфатов при его использовании является протекание химических реакций с участием гидроксида магния [12].

Целью данной работы было определение условий, обеспечивающих максимальное удаление фосфатов из возвратных потоков очистных сооружений с помощью обожженного доломита.

Основная часть. Объектами исследования в работе являлись доломит обожженный, возвратные потоки очистных сооружений, растворы фосфатов.

В работе использовали доломит месторождения Руба, который подвергали термообработке, в ходе ее варьировали следующие параметры: продолжительность, температуру, добавки-интенсификаторы обжига, дисперсность доломита. Об эффективности процесса судили по содержанию активного оксида магния, который определяли согласно ГОСТ 22688-77 [13]. Удельную поверхность материала определяли на анализаторе

удельной поверхности и пористости NOVA 2200 (Quantachrome Corp. США) методом адсорбции азота.

Иловые воды и фугат отбирали на очистных сооружениях с нагрузкой более 100 000 эквивалентных жителей. Отбор проб проводили в период с марта по май и с сентября по ноябрь 2016 года. Содержание фосфатов, азота аммонийного и значение pH в отобранных пробах представлены в табл. 1.

Растворы фосфатов с концентрацией 100 мг P/л готовили растворением навески KH_2PO_4 (ч. д. а.) в дистиллированной воде.

Исследование кинетики удаления фосфатов обожженным доломитом проводили на иловых водах из илоуплотнителя и фугате. Материал дозировали в пробу при постоянном перемешивании, дозировка обожженного доломита была принята по результатам ранее проводимых исследований и составляла 10 кг/м^3 [11]. Интенсивность перемешивания выбирали исходя из необходимости поддержания материала во взвешенном состоянии. Контроль содержания фосфатов и pH осуществляли через равные интервалы времени в течение 120 мин. Эксперименты проводили при температуре $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$.

В работе также выполнена оценка влияния аэрации и обработки ультразвуком (УЗ) на интенсивность удаления фосфатов. Для аэрации использовали воздухоувлукку АС-9603, расход воздуха – $300 \text{ дм}^3/\text{дм}^3 \cdot \text{ч}$. Обработку УЗ проводили в течение 5 мин с использованием ультразвуковой установки ИЛ100-6/1 при мощности излучателя 315Вт, после этого пробу перемешивали в течение 10 мин в режиме, указанном выше, и повторно обрабатывали УЗ. Пробы отбирали каждые 15 мин.

Для характеристики процессов отделения твердой фазы и обоснования вариантов последующего использования отработанного материала определяли скорость осаждения осадка, его объем, влажность и химический состав. Осаждение проводили в цилиндре объемом 250 см^3 . Объем осадка и концентрацию взвешенных веществ в надосадочной жидкости определяли после 15 мин отстаивания. Отстоявшийся осадок высушивали для определения его влажности, химического и минералогического состава.

Содержание фосфатов в предварительно отфильтрованных пробах определяли фотоколориметрическим методом в соответствии с ISO 6878 [14], а полученные значения пересчитывали на фосфор. Азот аммонийный анализировали в соответствии с ПНД Ф 14.1:2.4.276-2013 [15]. Значение pH определяли потенциометрическим методом на pH-метре И-160.1 МП с комбинированным электродом ЭСКЛ-08М.1, влажность осадка отработанного материала –

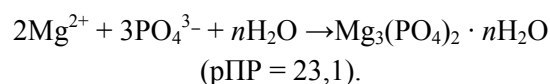
гравиметрически. Химический состав обожженного доломита и сухого остатка отработанного материала определяли методом энергодисперсионного анализа на электронном микроскопе JSM-5610 LV с системой химического анализа EDX JED-2201. Фазовый состав материалов устанавливали на дифрактометре D8 Advance Bruker AXS и ИК-Фурье спектрометре Nexus E.S.P.

Результаты и обсуждение. В результате обжига доломита при температуре до 750°C происходит его разложение с образованием оксида магния и карбоната кальция. С целью снижения температуры обжига и степени разложения карбонатного сырья используют различные солевые добавки. Наиболее полная информация о механизме их действия представлена в работе [16]. Следует отметить, что химическая активность оксида магния в значительной степени определяется его фазовым состоянием и размером кристаллов, зависящих от условий проведения обжига. Известно, что с увеличением температуры обжига наблюдается рост размеров кристаллов и снижается их способность к гидратации [17]. Это подтверждается результатами исследования влияния режимов обжига доломита на его активность и степень очистки фугата от фосфатов, представленными в табл. 2.

При прочих равных условиях обжига использование различных солевых добавок приводит к различным значениям активности обожженного доломита. По ее увеличению их можно расположить в ряд: CaCl_2 , NaCl , Na_2CO_3 , NaHCO_3 .

По сравнению с другими добавками использование для обжига добавки гидрокарбоната натрия позволяет в два раза увеличить активность обожженного доломита. Необходимо также отметить, что увеличение активности коррелирует с ростом степени очистки фугата от фосфатов. Наибольшая степень очистки – 97,2%, достигнута при использовании доломита с наибольшей активностью, а наименьшая наблюдалась в противоположном случае.

Активный оксид магния в воде образует гидроксид, за счет чего происходит увеличение значения pH. Гидроксид магния образует с фосфатами малорастворимые соединения по уравнению



В присутствии ионов аммония, которые в значительных количествах содержатся во всех возвратных потоках очистных сооружений, фосфаты связываются в магний-аммоний фосфат:

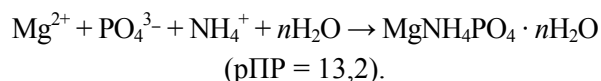


Таблица 1

Содержание фосфатов, азота аммонийного и значение рН в возвратных потоках очистных сооружений канализации

Показатель	Исходная сточная вода	Фугат	Иловая вода
Фосфаты, мг Р/дм ³	4–10	100–180	20–70
рН	7,4–8,2	6,4–7,0	6,7–7,5
Азот аммонийный, мг N/дм ³	20–40	40–60	10–30

Таблица 2

Сравнение эффективности применения обожженного доломита для очистки фугата

Добавка	Удельная поверхность, м ² /г	Потеря массы при обжиге, % мас.	Активность, % MgO	рН очищенной воды	Степень очистки от фосфатов, %
NaHCO ₃ ¹⁾	14	22,4	9,6	9,66	96,6
NaHCO ₃ ¹⁾	10	23,2	10,2	9,59	97,2
Без добавки ¹⁾	10	11,5	3,0	8,54	86,6
CaCl ₂ ¹⁾	10	24,1	2,6	8,42	73,0
NaCl ¹⁾	10	18,2	5,2	8,66	90,1
KNO ₃ ¹⁾	10	28,1	4,6	8,06	71,7
Na ₂ CO ₃ ¹⁾	10	13,8	4,8	8,73	90,1
Без добавки ²⁾	10	17,8	3,0	9,24	94,6

¹⁾ Режим обжига доломита – 30 мин при 500°C и 15 мин при 700°C;

²⁾ Режим обжига доломита – 60 мин при 750°C.

Для определения оптимального времени взаимодействия и выбора вариантов интенсификации связывания фосфатов проведен эксперимент по удалению фосфатов из фугата обезвоживания осадков сточных вод обожженным доломитом с удельной поверхностью 14 м²/г.

Результаты исследования приведены на рис. 1. Как видно из рис. 1, УЗ-обработка наиболее сильно интенсифицирует процесс извлечения фосфатов. Степень очистки за первые 15 мин взаимодействия достигает 87%, что на 25% больше, чем в условиях механического перемешивания. Это

объясняется увеличением удельной поверхности твердой фазы в результате диспергирования частиц доломита. Стоит отметить, что образующиеся мелкодисперсные частицы доломита могут увеличить время разделения суспензии. Аэрация также способствует ускорению процесса. Так, уже за первые 15 мин степень очистки превысила 77%, а после 30 мин аэрации степень очистки достигла 95% и сравнялась со степенью очистки при УЗ-обработке. Для всех исследуемых вариантов максимальная степень удаления фосфатов была достигнута за 2 ч и составляла 99,8%.

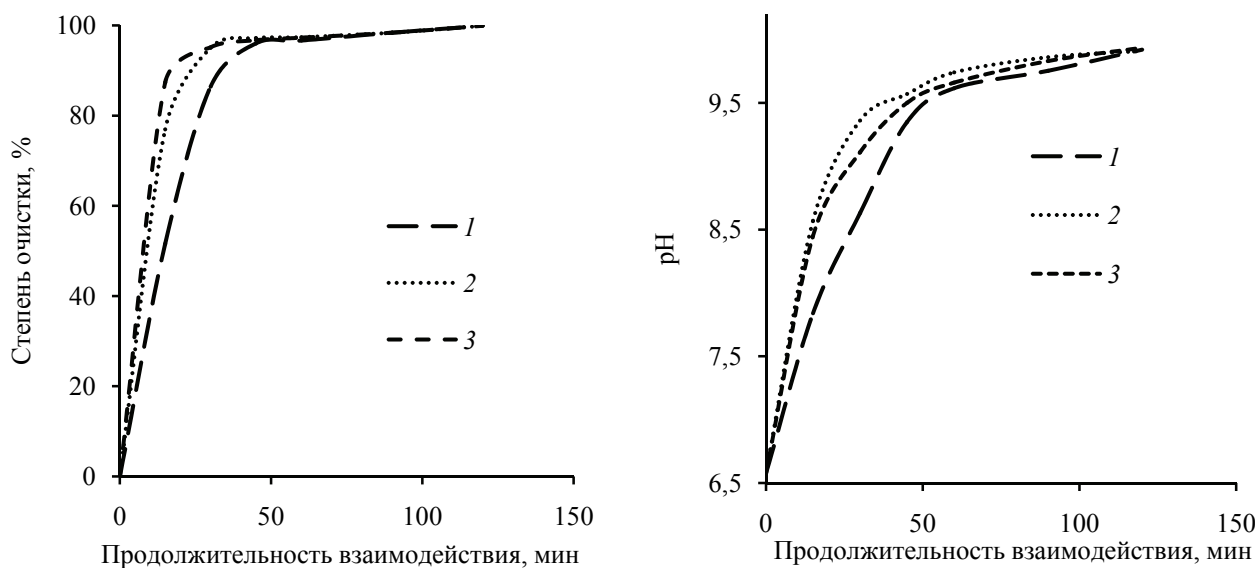


Рис. 1. Зависимости степени очистки и рН фугата от времени: 1 – механическое перемешивание; 2 – с аэрацией; 3 – с УЗ-обработкой

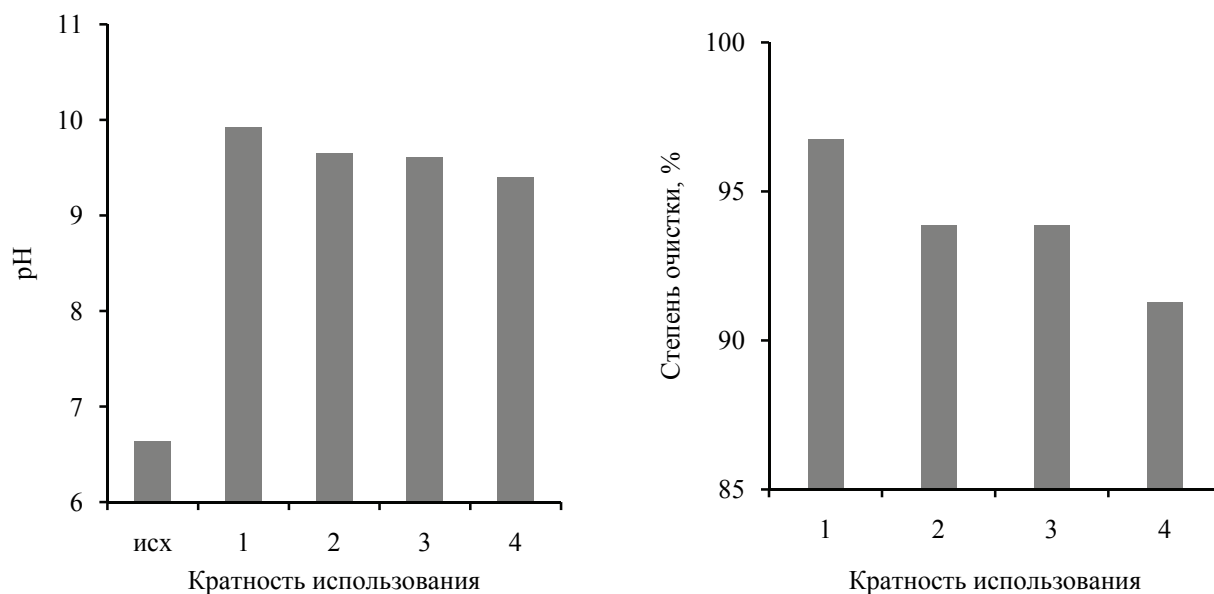


Рис. 2. Зависимость степени очистки и pH иловой воды от кратности использования:
исх – исходная иловая вода

Учитывая, что в течение однократного контакта обожженного доломита с иловой водой его химическая активность остается достаточно высокой, в работе исследовали возможность его многократного использования при УЗ-обработке. Исходная концентрация фосфатов в иловой воде составляла 30 мг Р/дм³. Эксперимент состоял в последовательном проведении нескольких 15-минутных циклов с УЗ-обработкой, после которых пробу отстаивали в течение 15 мин, надосадочную жидкость сливали сифоном, определяли в ней концентрацию фосфатов и pH. Перед анализом мелкодисперсные частицы отделяли от воды центрифугированием в течение 2,5 мин при 3000 мин⁻¹. К осадку приливалась свежая порция иловой воды. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

Коэффициент детерминации уравнения (R^2) равен 98,8%, стандартная ошибка 3,74%, значение абсолютной ошибки 2,61%. Аппроксимация результатов полученным уравнением регрессии показана на рис. 3 пунктирной линией, сплошной линией показаны границы 95%-ного интервала прогнозирования. Степень очистки для второго и последующих циклов снизилась, однако она осталась довольно высокой и после четырех циклов составляла 91%.

Как видно из данных табл. 3, концентрация фосфора в сухом веществе отработанного материала находится в диапазоне 1–2 мас. %. По данным рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопии установлено наличие в составе отработанного материала магний-аммоний фосфата и фосфата магния, а также брусшита.

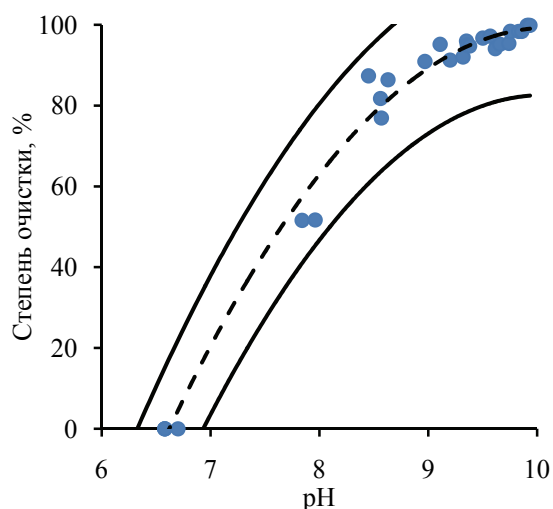


Рис. 3. Зависимость степени очистки от pH очищенной воды

Таблица 3

Химический состав материалов

Элемент	Содержание, мас. %		
	исходный доломит	после контакта с фугатом	после контакта с иловой водой
C	4,92	6,63	5,81
O	39,33	38,40	41,61
Mg	15,12	11,94	11,98
Al	0,47	0,85	0,68
Si	1,51	0,91	1,13
P	–	2,16	1,10
K	–	0,55	0,51
Ca	37,16	36,30	34,91
Fe	0,9	0,58	0,85
Zn	–	1,72	1,43

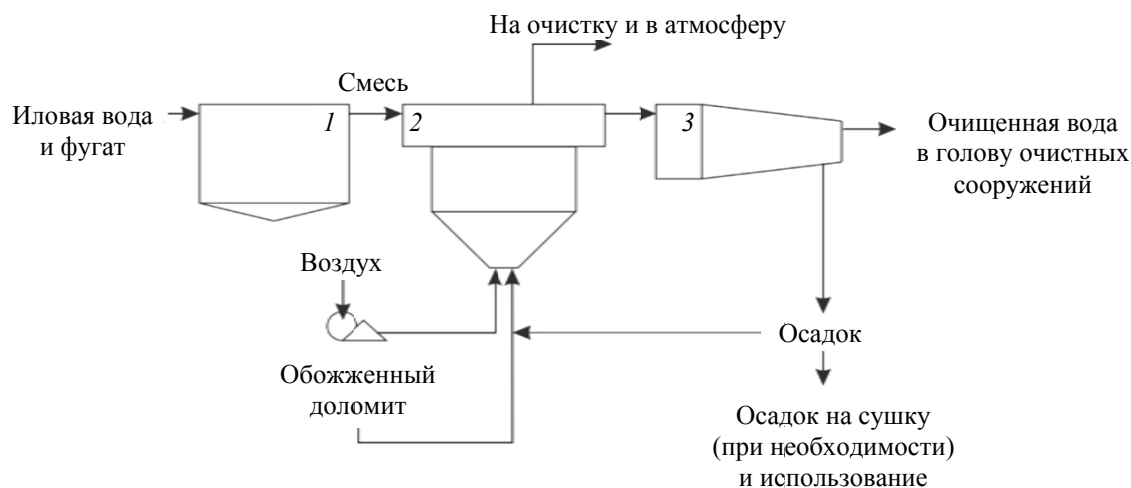


Рис. 4. Принципиальная технологическая схема очистки возвратных потоков очистных сооружений:
1 – емкость-накопитель; 2 – реактор взвешенного слоя; 3 – центрифуга

С учетом того, что перечисленные соединения применяются в качестве фосфорсодержащих удобрений [8], отработанный в процессе очистки материал может быть использован в качестве почвоулучшающей добавки, содержащей фосфор. При определении дозы внесения данного материала необходимо учитывать, что он может содержать катионы цинка и алюминия.

Вместе с тем как для фугата, так и иловой воды наблюдается сильная корреляция между значением степени очистки от фосфатов (η) и остаточным значением pH. Стоит также отметить, что фосфаты наиболее полно удаляются в области значений pH более 9,3. На основе представленных выше данных получено уравнение регрессии второго порядка, которое имеет следующий вид:

$$\eta = -7,36 + 1,65 \cdot \text{pH} - 0,082 \cdot \text{pH}^2.$$

Суспензия обожженного доломита после взаимодействия с фугатом характеризуется хорошими седиментационными свойствами. После 15-минутного отстаивания объем осадка не превышал 14% объема суспензии, концентрация взвешенных веществ в надосадочной жидкости не превышала 220 мг/дм³, а соответствующая этому степень уноса – 2,2%. Влажность образовавшегося осадка составляла 91%.

Химический состав исходного обожженного доломита и сухого вещества осадка, образующегося в результате взаимодействия его с иловой водой и фугатом, представлен в табл. 3.

На основе полученных данных предложена принципиальная схема очистки возвратных потоков очистных сооружений от фосфатов, представленная на рис. 4.

Вода из илоуплотнителя и от центрифуг обезвоживания осадка поступает в емкость-накопитель. Далее смесь иловых вод направляется в реактор, куда также дозируется обожженный доломит, активность которого превышает 9% MgO. Аэрация и перемешивание в реакторе обеспечиваются воздухом. Отходящий газ отводится в атмосферу. После достижения необходимой степени очистки от фосфатов суспензия подвергается разделению путем центрифугирования, осаждения или в гидроциклонах. Очищенная вода поступает в голову очистных сооружений. Осадок направляется на сушку (при необходимости) и использование. Реализация данной технологии позволит извлечь до 20% фосфора от общего количества, поступающего на очистные сооружения.

Выводы. Экспериментально показана высокая эффективность применения обожженного доломита для очистки возвратных потоков очистных сооружений. Установлено, что на степень удаления фосфатов наибольшее влияние оказывает активность обожженного доломита. Использование для обжига доломита гидрокарбоната натрия позволяет обеспечить наибольшую активность обожженного доломита.

Определены условия, обеспечивающие наибольшую степень очистки от фосфатов обожженным доломитом возвратных потоков очистных сооружений. Максимальная степень очистки фугата составляла 99,8%. Предложены способы интенсификации процесса – УЗ-обработка и аэрация. Получено эмпирическое уравнение, позволяющее прогнозировать степень очистки по значению pH обрабатываемой жидкости. Показано, что отработанный материал может найти применение в качестве почвоулучшающей добавки.

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, pp. 179–196.
2. Бутько А. А., Родькин О. И. Прогнозирование поступления фосфора в водные объекты с территории агроландшафтов // *Экологический вестник*. 2012. № 2. С. 76–83.
3. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши / О. П. Оксюк [и др.] // *Гидробиологический журнал*. 1993. Т. 29, вып. 4. С. 62–76.
4. Кадацкая О. В. Содержание минерального фосфора в речных водах бассейна Днепра: пространственно-временной анализ // *Природопользование*. 2009. № 16. С. 49–56.
5. Результаты наблюдений мониторинга поверхностных вод [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nsmos.by/tmp/fckimages/NSEM_book_2014/2-monitoring_poverhnostnyh_vod.pdf. Дата доступа: 17.11.2016.
6. Van Vuuren D. P., Bouwman A. F., Beusen A. H. W. Phosphorus demand for the 1970–2100 period: a scenario analysis of resource depletion. *Global environmental change*, 2010, vol. 20, no. 3, pp. 428–439.
7. Cordell D., White S. Peak phosphorus: clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security. *Sustainability*, 2011, vol. 3, no 10, pp. 2027–2049.
8. Towards global phosphorus security: A systems framework for phosphorus recovery and reuse options / D. Cordell [et al.]. *Chemosphere*, 2011, vol. 84, no. 6, pp. 747–758.
9. Nitrogen and Phosphorus-Rich Sidestreams: Managing the Nutrient Merry-Go-Round / Phillips H. M. [et al.]. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2006, no. 7, pp. 5282–5304.
10. Сапон Е. Г., Марцунь В. Н. Исследование очистки сточных вод от фосфатов материалами, полученными из природного сырья и отходов // *Труды БГТУ*. 2015. № 3: Химия и технология неорганических веществ. С. 20–28.
11. Sapon Ye. G., Martsul V. N. Phosphorus recovery from effluents of sludge treatment using sorption materials. *Selection publications from the Water Harmony project: Water Research and Technology*, 2015, pp. 178–184.
12. Roques H., Nugroho-Jeudy L., Lebugle A. Phosphorus removal from wastewater by half-burned dolomite. *Water Research*, 1991, vol. 25, no. 8, pp. 959–965.
13. Известь строительная. Методы испытаний: ГОСТ 22688-77; введ. 01.01.1979. М.: ИПК «Издательство стандартов», 1997, 19 с.
14. Качество воды. Определение фосфора. Спектрометрический метод с молибдатом аммония: СТБ ИСО 6878–2005; введ. РБ 01.06.2006. Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2005, 20 с.
15. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов аммония в природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера. ПНД Ф 14.1:2.4.276–2013; введ. 28.08.2013. М., 2013. 22 с.
16. Носов А. В., Черных Т. Н., Крамар Л. Я. Эффективность различных добавок-интенсификаторов при обжиге доломитов // *Строительные материалы*. 2014. № 6. С. 71–76.
17. Влияние морфологии минералов доломитового вяжущего на прочность / Т. Н. Черных [и др.] // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2014. Т. 14, № 3. С. 35–40.

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.
2. But'ko A. A., Rod'kin O. I. Prediction of phosphorus in water bodies from the territory of agricultural landscapes. *Ekologicheskiy vestnik* [Ecological bulletin], 2012, no. 2, pp. 76–83 (In Russian).
3. Oksiyuk O. P., Zhukinskiy V. N., Braginskiy L. P., Linnik P. N., Kuz'menko M. I., Klenus V. G. Complex ecological classification of surface water quality. *Gidrobiologicheskiy zhurnal* [Journal of hydrobiological], 1993, vol. 29, no. 4, pp. 62–76 (In Russian).
4. Kadatskaya O. V. The content of mineral phosphorus in the river waters of the Dnieper River Basin: spatial and temporal analysis. *Prirodopol'zovaniye* [Nature Management], 2009, no 16, pp. 49–56 (In Russian).
5. *Rezultaty nablyudeniy monitoringa poverkhnostnykh vod* [The results of observations of surface water monitoring]. Available at: http://www.nsmos.by/tmp/fckimages/NSEM_book_2014/2-monitoring_poverhnostnyh_vod.pdf (accessed 17.11.2016).

6. Van Vuuren D. P., Bouwman A. F., Beusen A. H. W. Phosphorus demand for the 1970–2100 period: a scenario analysis of resource depletion. *Global environmental change*, 2010, vol. 20, no. 3, pp. 428–439.
7. Cordell D., White S. Peak phosphorus: clarifying the key issues of a vigorous debate about long-term phosphorus security. *Sustainability*, 2011, vol. 3, no 10, pp. 2027–2049.
8. Cordell D., Rosemarin A., Schröder J. J., Smit A. L. Towards global phosphorus security: A systems framework for phosphorus recovery and reuse options. *Chemosphere*, 2011, vol. 84, no. 6, pp. 747–758.
9. Phillips H. M., Kobylinski 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.
10. Sapon E. G., Martsul V. N. Phosphates purification of waste water by natural materials and industrial wastes (comparative study). *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 3: Chemistry and technology of inorganic substances, pp. 20–28 (In Russian).
11. Sapon Ye. G., Martsul V. N. Phosphorus recovery from effluents of sludge treatment using sorption materials. *Selection publications from the Water Harmony project: Water Research and Technology*, 2015, pp. 178–184.
12. Roques H., Nugroho-Jeudy L., Lebugle A. Phosphorus removal from wastewater by half-burned dolomite. *Water Research*, 1991, vol. 25, no. 8, pp. 959–965.
13. GOST 22688–77. Building lime. Test methods. Moscow, IPK “Izdatel’stvo Standartov” Publ., 1979. 19 p. (In Russian).
14. STB ISO 6878-2005. Water quality. Determination of phosphorus. Ammonium molybdate spectrometric method. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy institut standartizatsii i sertifikatsii Publ., 2006. 20 p. (In Russian).
15. PND F 14.1:2:4.276-2013. Quantitative chemical analysis of water. Methods of measurement of the mass concentration of ammonium ions in natural and wastewaters by photometric method with Nessler reagent. Moscow, 2013, 22 p. (In Russian).
16. Nosov A. V., Chernykh T. N., Kramar L. Ya. Efficiency of Various Additives-Intensifiers in the Process of Dolomites Burning. *Stroitel’nyye materialy* [Construction Materials], 2014, no. 6, pp. 71–76 (In Russian).
17. Chernykh T. N., Nosov A. V., Kramar L. Ya., Orlov A. A. Effect of mineral morphology of the dolomitic binding material on strength. *Vestnik Yuzhno-Ural’skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel’stvo i arkhitektura* [Bulletin of SUSU. Series Construction Engineering and Architecture], 2014, vol. 14, no. 3, pp. 35–40 (In Russian).

Информация об авторах

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

Марцуль 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 Yehor Gennadievich – assistant lecturer, the Department of Industrial Ecology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sapon@belstu.by

Martsul Vladimir Nicalaevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Industrial Ecology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: martsul@belstu.by

Поступила 01.12.2016