

Очистка и переработка отходов

УДК 502.5:661.21

Черныш Е.Ю., канд. техн. наук*Сумской государственной университет, Сумы**ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина, e-mail: e.chernish@ssu.edu.ua*

Моделирование окислительной способности биопленки, иммобилизированной на гранулированном фосфогипсе в процессе газоочистки

Представлены результаты моделирования окислительной способности биопленки в процессе иммобилизации сероокисляющих групп микроорганизмов на фосфогипсовых гранулах в системе биодесульфуризации. При этом за основу были взяты базовые параметры кинетики бактериального роста с учетом ряда режимных параметров процесса биодесульфуризации и характеристик гранулированного носителя на основе фосфогипса. Полученные результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными, соответствующими динамике уменьшения концентрации сероводорода в газовом потоке, выходящем из биофильтра. Получил дальнейшее развитие экологически безопасный подход к использованию фосфогипса в качестве минерального носителя для развития ассоциации сероокисляющих микроорганизмов. Проведенные исследования позволяют оптимизировать процесс газоочистки и прогнозировать динамику биоconversion сероводорода при различных режимах нагрузки системы биодесульфуризации. *Библ. 13, рис. 3.*

Ключевые слова: окислительная способность, биопленка, минеральный носитель, фосфогипс, газоочистка.

На сегодняшний день фосфогипс, относящийся к четвертому классу опасности, является многотоннажным отходом химической промышленности. Его отвалы в первую очередь становятся причиной отчуждения значительных по площади территорий из природных экосистем, причем не только на территории Украины, но и на просторах сопредельных и европейских государств. Так, только на территории нашей страны фосфогипса накоплено около 90 млн т [1]. При этом отвалы фосфогипсовых отходов становятся источниками повышенной техногенной нагрузки в регионе, что обусловлено загрязне-

нием атмосферы испаряющимися соединениями фтора, подкислением стекающих дождевых вод до pH 3–5 в зависимости от возраста отвала, усилением подвижности токсичных компонентов [2, 3] и возможности миграции их в почвы вокруг отвалов.

Анализ литературных данных и постановка проблемы

Существуют различные способы утилизации фосфогипсовых отходов, что делает возможным уменьшение негативного их воздействия на окружающую среду. Достаточно новыми

среди них являются способы использования фосфогипса в технологиях защиты окружающей среды. Рассмотрим их более детально.

В [4] предлагается переработка фосфогипса в серную кислоту и известь, при этом отмечается, что наиболее целесообразно размещать соответствующее производство вблизи угольных электростанций, использующих технологию циркулирующего кипящего слоя, так как в данной технологии СаО-содержащее вещество используют для связывания оксидов серы, образующихся в процессе горения топлива. Такое производство серной кислоты и извести из фосфогипса на сегодняшний день является нерентабельным по сравнению с методами получения этого продукта из традиционного сырья. Поэтому в мире пока работают только две установки по получению серной кислоты и извести из фосфогипса.

В [5] обоснована целесообразность создания рентгенозащитных конструкций из композиционного материала на основе фосфогипса. Однако требуются дальнейшие исследования механизмов влияния композиционных материалов на основе фосфогипсовых вяжущих на эффективность защиты от рентгеновского и гамма-излучений.

Другим перспективным направлением использования фосфогипса является его применение в биотехнологических процессах. В работе [6] описана обработка осадков сточных вод в системах анаэробной ферментации с осаждением тяжелых металлов сероводородом — продуктом жизнедеятельности сульфатредукторов, где фосфогипс выступает минеральной добавкой для интенсификации развития бактериальной культуры.

Одним из возможных способов утилизации фосфогипсовых отходов является использование в технологиях биоочистки газовых потоков. При этом иммобилизация тиобактерий на минеральной подложке из дигидратного фосфогипса была изучена для высоконагруженных по сероводороду систем биодесульфуризации в работах [7, 8].

Таким образом, важным направлением интенсификации биологической очистки является использование различного вида материальных носителей для закрепления в пространстве биофильтров активной биомассы микроорганизмов и внедрение новых методов сорбции иммобилизованной биомассы. Чаще всего для загрузки в реактор биологической культуры в качестве носителя используют полиуретан, гранулированный активированный уголь, носитель на основе неорганического полимерного композита высо-

копористой структуры, загрузку из кислотоустойчивого сорбента (лавсановых ершей), Са-альгинат, кольца полипропилена, торф, тирсу, пенополиуретан [9–11]. В процессе автоселекции может формироваться ацидофильная ассоциация микроорганизмов, что может вызывать образование серной кислоты, поэтому в технологическом процессе происходит переход значений рН из щелочной в кислую среду. Недостатки носителей из природных материалов (активированный уголь, тирса, торф) следующие: агрессивная среда (рН 4,0–5,0) влияет на сорбционные свойства носителей и быстро их разрушает, практически исключается возможность эффективной регенерации. Синтетические носители механически более стойкие, однако также требуют постоянного подвода питательных веществ в реактор для поддержания метаболизма биологических агентов, что экономически затратно. Поэтому применения фосфогипсовых гранул в этой сфере является многообещающим.

Одним из возможных направлений его утилизации может стать использование в биотехнологиях очистки серосодержащих газов, что требует проведения дальнейших исследований в этой области при разных режимных параметрах и нагрузке по сероводороду систем биодесульфуризации. Соответственно необходимо проводить оптимизацию и автоматизацию процесса экологически безопасной утилизации фосфогипсовых отходов в системах биологической очистки газовых потоков.

Цель и задачи исследования

Цель работы — моделирование окислительной способности биопленки в процессе иммобилизации сероокисляющих групп микроорганизмов на фосфогипсовых гранулах в системе биодесульфуризации.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- экспериментально изучить окислительную способность биопленки сероокисляющих групп микроорганизмов в системе биологической газоочистки при использовании в качестве иммобилизационного носителя фосфогипса;
- математически описать окислительную способность биопленки, иммобилизированной на гранулированном фосфогипсе.

Моделирование процесса газоочистки с применением гранулированного фосфогипса

Лабораторная экспериментальная установка-биофильтр представлена на рис.1. В данном исследовании в систему вводили газовую смесь

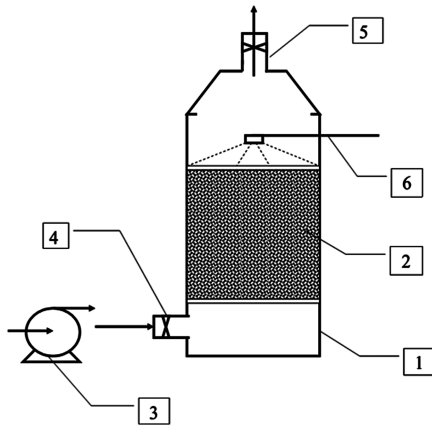


Рис.1. Экспериментальная лабораторная установка: 1 — колонна из оргстекла; 2 — гранулированный носитель из фосфогипса; 3 — компрессор; 4 — штуцер для подачи газовой смеси; 5 — штуцер для отвода очищенного газа; 6 — ороситель спринклерный.

с вариацией по содержанию в ней сероводорода от 100 до 850 млн⁻¹.

Проводился контроль следующих параметров: концентрации H₂S на выходе из биофильтра и значения pH через регулярные промежутки времени (0,5; 1; 1,5 ч). Биогазоочистка проводилась в мезофильном режиме (303 К).

Исследования газовой фазы проводились на лабораторном газовом хроматографе СЭЛМИХРОМ-1 (Сумы, Украина). Были использованы три последовательно подключенные колонки: предварительная PLOT колонка с «PorapLOT Q»; балластная колонка с «Хроматон N-AW-DMCS»; HP-PLOT колонка с молекулярным ситом Mole Sieve. В качестве газа-носителя был использован аргон, скорость потока 25·10⁻⁶ м³/мин.

Исследование формы и клеточной структуры выполняли на трансмиссионном электронном микроскопе ЭМИ 100АК (НПО «Электрон», Сумы, Украина).

Результаты моделирования окислительной способности био пленки в процессе газоочистки

Объем био пленки увеличивается при росте количества поступающего сероводорода или уменьшении скорости фильтрации через слой загрузки газового потока. При этом использование тиобактериями в качестве субстрата компонентов фосфогипса, как показали исследования [7], приводит к формированию стойкой био пленки, которая является сообществом разных типов микроорганизмов.

Скорость газового потока не должна превышать окислительной способности био пленки,

которая образуется на поверхности минерального носителя и проникает в его внутренний слой.

Для оптимизации оценки окислительной способности био пленки (ОСБ) была взята за основу классическая кинетика роста микроорганизмов. Кроме того, предложено учитывать режимные параметры системы и физико-механические свойства гранулированной загрузки. При этом стоит брать в расчет именно активную поверхность био фильтра (S_{п.п}), которая учитывает только поверхность био фильтра, содержащую бактериальную пленку, то есть удельную площадь поверхности био пленки, развитую на минеральном носителе из фосфогипса:

$$ОСБ = \left(\frac{S_{п.п} V_{ф.з} G D}{\tau_{ф} V_{ф}} \right) \times \quad (1)$$

$$\times \left[\frac{\mu_{m1} X_1 \Delta C_{H_2S}}{Y_{X1/S1} (K_S + C_{0H_2S}) K_{pH}} + \frac{\mu_{m2} X_2}{Y_{X2/S2}} \right] \alpha_{ф},$$

где ОСБ — окислительная способность био пленки, г/(м³·ч); S_{п.п} — удельная площадь поверхности био пленки, м²/м³; V_{ф.з} — объем фильтрующей загрузки, м³; G — коэффициент размера гранул загрузки (100/R); R — характерный размер гранул (10⁻³ м); D — диаметр био фильтра, м; τ_ф — время удержания газожидкостной фазы в био фильтре, ч; v_ф — скорость фильтрации газового потока, м²/ч; μ_{m1}, μ_{m2} — удельная скорость роста тиобактерий и нитрифицирующих бактерий соответственно, сут⁻¹; X₁, X₂ — концентрация биомассы тиобактерий и нитрифицирующих бактерий соответственно, г/10⁻³ м³; Y_{X1/S1}, Y_{X2/S2} — экономический коэффициент выхода биомассы тиобактерий и нитрифицирующих бактерий по субстрату — сероводороду и аммиаку соответственно; C_{0H2S} — начальная концентрация сероводорода в газовом потоке, г/м³; K_S — константа сродства к субстрату, г/м³; α_ф — поправочный коэффициент.

В формуле (1) была учтена специфика процесса фильтрации газового потока через гранулированную минеральную загрузку. Первый множитель описывает скорость, с которой растворенный сероводород проходит через гранулированный носитель из фосфогипса и контактирует с био пленкой с учетом режимных параметров ввода газового потока в систему и влияние на него основных характеристик био фильтра. Также был введен поправочный коэффициент α_ф, который учитывает интенсифика-

цию развития тиобактерий при их иммобилизации на фосфогипсовых гранулах.

Второй множитель описывает влияние микробной кинетики на процесс конверсии сероводорода, проходящего через минеральную загрузку из фосфогипса. При этом за основу была взята стационарная фаза развития бактерий для учета базовых параметров кинетики их роста, когда концентрация биомассы остается на постоянном уровне, то есть скорость прироста биомассы полностью компенсируется скоростью гибели и лизиса клеток. Так, соотношение $\mu_{m1} X_1/Y_{X1/S1}$ — расход субстрата (сероводорода) в процессе наращивания биомассы тиобактериями. Также предложено для учета динамики изменения концентрации сероводорода при насыщении по субстрату (сероводороду) биомассы тиобактерий ввести отношение $\Delta C_{H2S}/(K_S + C_{0H2S})$.

Поскольку концентрация субстрата и общее число клеток M связаны линейно, то изменение концентрации сероводорода (ΔC_{H2S}) при прохождении максимума по M_a (числу жизнеспособных клеток) можно представить в таком виде (при $\mu_{m1} = \text{const}$):

$$dC_{H2S}/dt = C_{0H2S} - [(K_S/Y_{X1/S1}) \times (e^{(\mu_{m1} - \lambda_1)\tau} - 1)], \quad (2)$$

где λ_1 — константа скорости инактивации — частота отказов, приводящих к потере способностей клеток тиобактерий к размножению, сут⁻¹.

При реализации математической модели использовали значения констант, взятых из литературных источников [12, 13]. Исходные данные определяли в соответствии с биохимическими условиями проведения процесса очистки газового потока.

Исходные данные для проведения математического моделирования приведены ниже:

| | | |
|---------------|---|---|
| X_1 | — | $112,7 \cdot 10^{-3} \text{ г} / 10^{-3} \text{ м}^3$ |
| $S_{п.п.}$ | — | $200 \text{ м}^2 / \text{м}^3$ |
| $V_{ф.з.}$ | — | $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ |
| G | — | $0,04 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ |
| $\tau_{ф.}$ | — | 1,5 ч |
| D | — | 0,15 м |
| $\alpha_{ф.}$ | — | 2,52 |

При этом значения C_{H2S} изменялись в диапазоне, млн⁻¹: 100, 250, 400, 550, 700, 850. Для разработки компьютерной модели использовался язык программирования C++ в интегрированной среде Borland C++, который предназначен для описания широкого круга задач и содержит механизмы управления вычислительным процессом и работы с данными, что оптимально подходит для решения поставленной задачи.

Обсуждение результатов моделирования окислительной способности био пленки

Полученные результаты моделирования окислительной способности био пленки, иммобилизированной на гранулированном фосфогипсе, свидетельствуют, что на начальном этапе развития процесса биодесульфуризации происходит адаптация микроорганизмов к условиям в био-фильтре и глубина удаления из газового потока сероводорода составляет 40 % от начального значения 850 млн⁻¹ в первый полупериод 0,5 ч (рис.2). В этих условиях рост тиобактерий осуществляется по экспонциальному закону. В последующий период 0,5 ч происходит падение концентрации сероводорода до 56 млн⁻¹. Концентрация сероводорода падает до нулевого уровня через 1,5 ч.

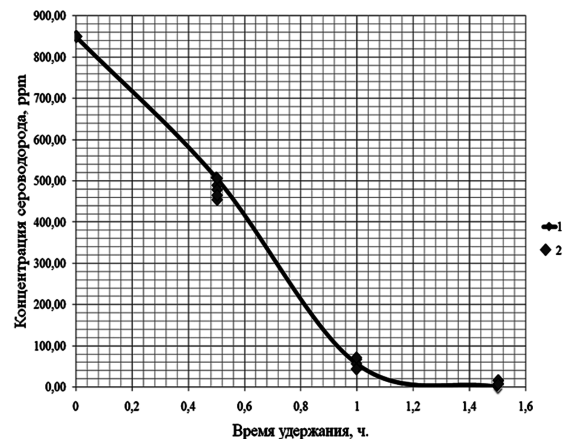


Рис.2. Динамика изменения концентрации сероводорода во времени: 1 — модель; 2 — экспериментальные значения.

Скорость роста тиобактерий зависит от начальной концентрации сероводорода в газовом потоке, которая при превышении окислительной способности био пленки приводит к значительному увеличению времени удержания газового потока в био-фильтре, что установлено в [8] для высоконагруженных по H₂S систем биодесульфуризации. Динамика потребления сероводорода тиобактериями (см. рис.2) свидетельствует об эффективности использования микроорганизмами фосфогипса как дополнительного источника минеральных веществ, что нивелирует необходимость ввода дополнительных питательных веществ в пространство био-фильтра и удешевляет процесс биологической газоочистки.

В процессе биодесульфуризации происходит окисление сероводорода до элементарной серы, что соответствует падению его концентрации до определенного уровня, который совпадает с изменением динамики окислительной спо-

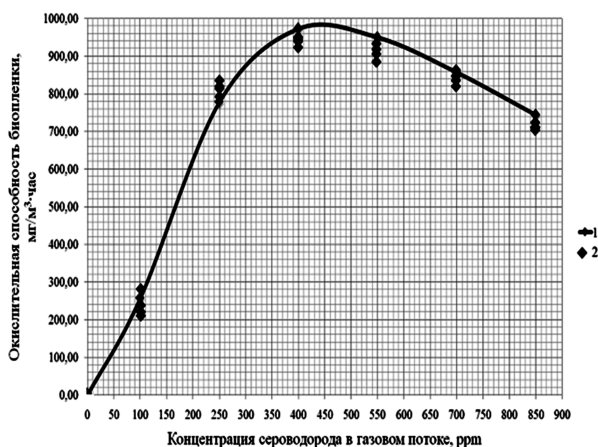


Рис.3. Кривая окислительной способности биопленки: 1 — модель; 2 — экспериментальные значения.

способности биопленки при разных первичных концентрациях сероводорода. Так, его концентрация падает от 850 до 54,31–69,52 млн⁻¹ в серии экспериментов в течение 1 ч при окислительной способности биопленки 743,58 мг/(м³·ч) (рис.3).

Полученная в результате математического моделирования кривая, соответствующая динамике уменьшения концентрации сероводорода во времени, имеет хорошую сходимость с опытными данными (рис.3). Наибольшее убывание концентрации сероводорода приходится на второй полупериод — от 0,5 до 1,0 ч, что соответствует стабилизации развития бактериальной пленки после окончания адаптационного периода.

Выводы

Проведенное исследование позволяет оптимизировать процесс газоочистки и прогнозировать динамику биоконверсии сероводорода при различных режимах нагрузки системы биодесульфуризации.

Математически описана окислительная способность биопленки сероокисляющих групп микроорганизмов в системе биологической сероочистки с учетом ряда факторов, в частности, физико-механических свойств носителя из фосфогипса, режимных параметров системы и микробиологических характеристик бактериальной популяции. Расчетные кривые изменения концентрации сероводорода во времени и окислительной способности биопленки при разных исходных концентрациях сероводорода (от 100 до 850 млн⁻¹) в газовом потоке имеют хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Направлением дальнейших исследований является проведение опытно-промышленных испытаний разработанной технологии биологической газоочистки.

Список литературы

1. Кожушко В.П. Гидрофобизация изделий из гипсовых вяжущих — одно из направлений расширения сферы их применения в строительстве // Вест. Харьк. нац. автомобил.-дорож. ун-та. — 2005. — № 29. — С. 83–86.
2. Мирка Г.Е., Рудой Н.Г. Проблемы утилизации техногенных отходов промышленных предприятий Сумской области // Материалы III Междунар. конф. «Сотрудничество для решения проблемы отходов», Харьков, 7-8 февраля 2006 г. — Харьков, 2006. — С. 101–102.
3. Degirmenci N., Okucu A., Turabi A. Application of phosphogypsum in soil stabilization // Building and Environment. — 2007. — Vol. 42, № 9. — P. 3393–3398.
4. Манжина С.А., Денисов В.В., Денисова И.А. Использование крупнотоннажного отхода фосфогипса для снижения SO₂-содержащих выбросов угольной теплоэлектростанции // Инж. журн. Дона. — 2014. — Т. 28, вып.1. — С. 77–87.
5. Булат А.Ф., Иванов В.А., Голов К.С., Мисовец Ю.В. Рентгенозахисні властивості фосфогіпсового в'язучого з рідкоземельним наповнювачем // Наук. вісн. Нац. гірнич. ун-ту. — 2010. — № 5. — С. 48–51.
6. Plyatsuk L.D., Chernysh E.Yu. Intensification of the anaerobic microbiological degradation of sewage sludge and gypsum waste under bio-sulfidogenic conditions // The Journal of Solid Waste Technology and Management (USA). — 2014. — Vol. 40, № 1. — P. 10–23.
7. Черныш Е.Ю. Применение фосфогипса в экотехнологии газоочистки с образованием элементарной серы // Экологический вестник. — 2015. — № 1. — С. 73–79.
8. Черныш Е.Ю., Яхненко Е.Н. Определение режимных параметров работы высоконагруженных систем биодесульфуризации с применением фосфогипса // Вісник НТУ «ХПИ». Сер. Нові рішення в сучасних технологіях. — 2016. — № 12. — С. 207–212. — doi:10.20998/2413-4295.2016.12.31.
9. Pat. 0845288 EP, Int. Cl.⁶ B 01 D 53/84, C 10 L 3/10. Process for biological lremoval of sulphide, A.J.H. Janssen, C.J.N. Buisman, Publ. 03.06.98, Bul. 1998/23.
10. Park Byoung-Gi C., Shin Won S., Chung J.S. Simultaneous Biofiltration of H₂S, NH₃ and Toluene using an Inorganic Polymeric Composite // Environ. Eng. Res. — 2008. — Vol. 13, № 1. — P. 19–27.
11. Ramirez M., Gymez J.M., Cantero D. Removal of hydrogen sulphide by immobilized Thiobacillus thioautotrophicus in a biofilter packed with polyurethane foam // Bioresource Technology. — 2009. — Vol. 100, Iss. 21. — P. 4989–4995.
12. Namgung H.-K., Song Ji Hyeon. The Effect of Oxygen Supply on the Dual Growth Kinetics of Acidithiobacillus thiooxidans under Acidic Conditions for Biogas Desulfurization // Inter. J. Envi-

- ron. Res. Public Health. — 2015. — № 12. — P. 1368-1386. — doi:10.3390/ijerph120201368.
13. Vollertsen J., Nielsen A.H., Jensen H.S., Rudelle E.A., Hvitved-Jacobsen T. Modeling the corrosion of concrete sewers // Materials of 12th Inter. Conf. on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil, 11–16

Sept. 2011. — Available at: <https://web.sbe.hw.ac.uk/staffprofiles/bdgsa/temp/12th%20ICUD/PDF/PAP005127.pdf>

Поступила в редакцію 22.07.16

Черниш Є.Ю., канд. техн. наук

Сумський державний університет, Суми

вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна, e-mail: e.chernish@ssu.edu.ua

Моделювання окислювальної здатності біоплівки, що іммобілізована на гранульованому фосфогіпсі у процесі газоочищення

Представлено результати моделювання окислювальної здатності біоплівки у процесі іммобілізації сіркоокислюючих груп мікроорганізмів на фосфогіпсових гранулах у системі біодесульфуризації. При цьому за основу були взяті базові параметри кінетики бактеріального росту з урахуванням ряду режимних параметрів процесу біодесульфуризації й характеристик гранульованого носія на основі фосфогіпсу. Отримані результати моделювання узгоджуються з експериментальними даними, що відповідають динаміці зменшення концентрації сірководню у газовому потоці, який виходить з біофільтра. Дістав подальшого розвитку екологічно безпечний підхід до використання фосфогіпсу як мінерального носія для розвитку асоціації сіркоокислюючих мікроорганізмів. Проведені дослідження дають змогу оптимізувати процес газоочищення й прогнозувати динаміку біоконверсії сірководню при різних режимах навантаження системи біодесульфуризації. *Бібл. 13, рис. 3.*

Ключові слова: окислювальна здатність, біоплівка, мінеральний носій, фосфогіпс, газоочищення.

Chernysh Ye.Yu., Candidate of Technical Sciences

Sumy State University, Sumy

2, Rym'skogo-Korsakova Str., 40007 Sumy, Ukraine, e-mail: e.chernish@ssu.edu.ua

Modeling Oxidative Capacity of Biofilm Immobilized on Granular Phosphogypsum During Gas Purification

The article focused on the modeling of biofilm oxidative capacity under immobilization of sulfur-oxidizing microorganisms groups on phosphogypsum granules in the bio-desulfurization system. The oxidizing capacity of the biofilm was described, that included the basic parameters of bacterial growth kinetics, taking into account regime parameters of bio-desulfurization process and characteristics of phosphogypsum granular support. The results of mathematics modelling are consistent with experimental data corresponding to the dynamics reduce the concentration of hydrogen sulfide in the gas stream exiting the biofilter. The further development of environmentally safe approach to the use of phosphogypsum was determined as a mineral carrier for the development of the association of sulfur-oxidizing microorganisms. These investigations allow optimization of the gas purification and predicting of the dynamics of hydrogen sulfide removal under various modes of bio-desulfurization system load. *Bibl. 13, Fig. 3.*

Key words: oxidative capacity, biofilm, mineral carrier, phosphogypsum, gas purification.

References

1. Kozhushko, V.P., [Hydrophobisation of articles from gypsum binders is one of the expansion of their using in construction], *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 2005, (29), pp.83–86. (Rus.)
2. Mirka, G.E. and Rudoi, N.G. [Problems of technogenic waste recycling industry Sumy region], *Proceedings of the 3rd International Conference «Cooperation for Waste Issues»*, Kharkov, 7-8 Feb. 2006, Kharkov, 2006, pp. 101–102. (Rus.)
3. Degirmenci, N., Okucu, A. and Turabi, A. Application of phosphogypsum in soil stabilization, *Building and Environment*, 2007, 42 (9), pp. 3393–3398.
4. Manzhina S.A., Denisov V.V., Denisova I.A. [Using of large-scale waste phosphogypsum to reduce emissions of SO₂-containing coal power plant], *Engineering Journal of Don*, 2014, 28, Iss. 1, pp. 77–87. (Rus.)
5. Bulat A.F., Ivanov V.A., Holov K.S., Mysovets Yu.V. [Radio-protective properties of phosphogypsum binding agent with rare-earth filler], *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2010, (5), pp. 48–51. (Ukr.)
6. Plyatsuk, L. and Chernysh, Ye., Intensification of the anaerobic microbiological degradation of sewage sludge and gypsum waste under bio-sulfidogenic conditions, *The Journal of Solid Waste Technology and Management (USA)*, 2014, 40 (1), pp. 10–23.
7. Chernysh Ye.Yu. [Application of phosphogypsum in the ecotechnology of gas purification with elemental sulfur formation], *Ehkologicheskij vestnik*, 2015, (1), pp. 73–79. (Rus.)
8. Chernysh Ye.Yu., Yakhnenko E.N. [Determination of regime parameters of heavy loaded of bio-desulfurization system with phosphogypsum using], *Bulletin of NTU «KhPI». Series: New solutions in modern technologies*, 2016, (12), pp. 207–212, doi:10.20998/2413-4295.2016.12.31. (Rus.)
9. Pat. 0845288 EP, Int. Cl.⁶ B 01 D 53/84, C 10 L 3/10. Process for biological removal of sulphide, A.J.H. Janssen, C.J.N. Buisman, Publ. 03.06.98, Bul. 1998/23.
10. Park Byoung-Gi, C., Won, S., Shin and Chung, J. S., Simultaneous Biofiltration of H₂S, NH₃ and Toluene using an Inorganic Polymeric Composite, *Environ. Eng. Res.*, 2008, 13 (1), pp. 19–27.
11. Ramirez, M., Gymez, J. M. and Cantero D. Removal of hydrogen sulphide by immobilized *Thiobacillus thioparus* in a biofilter packed with polyurethane foam, *Bioresource Technology*, 2009, 100, Iss. 21, pp. 4989–4995.
12. Namgung H.-K. and Song Ji Hyeon. The Effect of Oxygen Supply on the Dual Growth Kinetics of *Acidithiobacillus thiooxidans* under Acidic Conditions for Biogas Desulfurization, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2015, (12), pp. 1368–1386. — doi:10.3390/ijerph120201368.
13. Vollertsen, J., Nielsen, A.H., Jensen, H.S., Rudelle, E.A. and Hvitved-Jacobsen, T. Modeling the corrosion of concrete sewers, *Materials of 12th International Conference on Urban Drainage*, Porto Alegre, Brazil, 11–16 Sept. 2011. — Available at: <https://web.sbe.hw.ac.uk/staffprofiles/bdgsa/temp/12th%20ICUD/PDF/PAP005127.pdf>

Received July 22, 2016