

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЮВАННЯ ФОСФОГІПСУ ДЛЯ СИСТЕМ БІОДЕСУЛЬФУРИЗАЦІЇ

Е. Ю. ЧЕРНЫШ, Е. Н. ЯХНЕНКО\*, Л. Д. ПЛЯЦУК

Кафедра прикладної екології, Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА  
\*email: o.jakhnenko@ecolog.sumdu.edu.ua

**АНОТАЦІЯ** В статті описано лабораторну модель процесу грануляції фосфогіпсу, визначено оптимальний середній розмір гранул мінерального завантаження з фосфогіпсу з урахуванням особливостей розвитку біоплівки; досліджено особливості процесу розвитку бактеріального матриксу сіркоокислюючих бактерій на гранулах відвального дигідратного фосфогіпсу. Визначено особливості впливу часу гранулювання і вологості фосфогіпсу на процес гранулювання, а також апроксимовані рівняннями регресії вплив даних факторів на оптимізацію процесу гранулоутворення. Теоретично та експериментально обґрунтовано склад добавок для модифікації гранул фосфогіпсу.

**Ключові слова:** мінеральний носій; фосфогіпс; гранулювання; матрикс сіркоокислюючих бактерій.

## OPTIMIZATION OF THE PHOSPHOGYPSUM GRANULATION FOR BIO-DESULFURIZATION SYSTEMS

E. CHERNISH, E. YAKHNENKO, L. PLYATSUK

Department of applied ecology, Sumy State University (SSU), Sumy, UKRAINE

**ABSTRACT** The paper focused on describes a laboratory model of granulation phosphogypsum. Phosphogypsum is a kind of gypsum that occurs as a by-product and was obtained from phosphate rock during the production of phosphoric acid in fertilizer plants. The most optimal conditions for the granulation process were determined. The optimal average grain size of phosphogypsum granules of mineral download for the development of biofilms was determined. The features of the development of matrix of sulfur-oxidizing bacteria under dehydrate phosphogypsum granules was studied. The parameters of granulation process were estimated such as granulation time and humidity of phosphogypsum at process. The optimum humidity range with addition of hydrated lime was observed during the process of dihydrate phosphogypsum granulation. The regression equations for approximated of the impact of these factors for process optimization granulation was developed. The biofilm of biomass was found in the surface of the granules after Micro X-ray analysis. Bacterial matrix penetrates deep into the pores of the thin pellet. The mineral components of granulated material were subjected to enzymatic transformation by cells, forming an internal "bioactive layer". The clusters of amorphous sulfur deposits were formed on the surface of the phosphogypsum granular load, which indicates the active metabolism of Thiobacillus. Using the bio-activity properties under optimum conditions for treatment of the phosphogypsum waste leads to obtain a product that can be safely used in many biotechnological applications.

**Keywords:** mineral carrier; phosphogypsum; granulation; matrix of sulfur-oxidizing bacteria; biotechnological applications.

### Вступ

Сьогодні на території України у відвалах знаходиться близько 30 млн. тон фосфогіпсу [1]. Відповідно актуальним є розробка нових напрямків утилізації фосфогіпсових відходів.

Відповідно цьому присвячено праці вітчизняних та зарубіжних вчених [2-9]. Так, в [2] пропонується переробка фосфогіпса в сірчану кислоту й вапно, при цьому відзначається, що найбільше доцільно розміщати відповідне виробництво поблизу вугільних електростанцій, що використовують технологію циркулюючого киплячого шару, так як в даній технології CaO – вмісту речовину використовують для зв'язування оксидів сірки, що утворюються в процесі горіння палива. Таке виробництво сірчаної кислоти й вапна з фосфогіпса на сьогоднішній день є нерентабельним у порівнянні з методами одержання цього продукту із традиційної сировини, тому у світі поки працюють тільки дві

установки по одержанню сірчаної кислоти й вапна з фосфогіпса.

В [3] обґрунтована доцільність створення рентгенозахистних конструкцій з композиційного матеріалу на основі фосфогіпса. Однак потрібні подальші дослідження механізмів впливу композиційних матеріалів на основі фосфогіпсових в'язких на ефективність захисту від рентгеновського й гамма-випромінювань.

Для вилучення рідкісноземельних елементів (РЗЕ) з фосфогіпса використовуються методи обробки його сірчаною, азотною кислотами, з переведенням рідкісноземельних елементів у розчин і наступним їхнім вилученням з розчину обробкою аміаком, лугами, фторидами і т.д. [4-6]. Варто відміти, що при реалізації таких технічних рішень відбувається утворення значних об'ємів стічних вод, які також потребують подальшої обробки та утилізації. Процес енергомісткий та потребує значних витрат хімічних реагентів. При цьому такі способи вилучення РЗЕ з

фосфогіпса не дозволяють одержати досить високий результат (ступінь вилучення коливається від 25 до 80%). Крім того, описані технології вимагають великих об'ємів обладнання для сірчаноокислого вилуговування й фільтрувального устаткування.

Важливим є використання фосфогіпсових відходів в сільському господарстві, існують розробки щодо його застосування як меліоранту та як компонента мінеральних добрив [7,8]. При внесенні в ґрунт фосфогіпсу може мати місце посилення вертикальної й горизонтальної міграції важких металів, що необхідно враховувати при його дозуванні. Необхідно зазначити, що на сьогодні все більше в наукових працях приділяється увага вдосконаленню технологічних рішень при обробці цього відходу для зниження швидкості вимивання мікроелементів з добрив на його основі.

Одним із перспективних напрямків є утилізація фосфогіпсових відходів у біотехнологічних системах, зокрема системах біодесульфуризації газових потоків [10-11]. Використання фосфогіпсу як мінерального носія для ряду еколого-трофічних груп мікроорганізмів обумовлює можливість розширення сфери застосування його в біотехнологічних процесах.

Одним із важливих завдань є оптимізація процесу виробництва гранул із фосфогіпсу з урахуванням особливостей розвитку на їх поверхні біоплівки потрібних видів бактерій.

### Формулювання мети роботи

Мета роботи - оптимізація процесу гранулювання фосфогіпсу.

Відповідно до мети були визначені завдання дослідження:

- визначення оптимального середнього розміру гранул з урахуванням особливостей розвитку біоплівки;
- визначення впливу часу гранулювання і вологості фосфогіпсу на процес гранулювання.

### Викладення основного матеріалу

#### Матеріали і методи дослідження.

**Лабораторна модель процесу грануляції фосфогіпсу.** Попередньо відвальний фосфогіпс висушували при температурі +60°C протягом 1 години. Надалі фосфогіпс переносили в обертовий тарілчастий гранулятор (рис.1).

Тарілка діаметром 250 мм і висотою бортів 65 мм була виготовлена з нержавіючої сталі. Швидкість обертання тарілки змінювали від 50 до 80 об/хв.

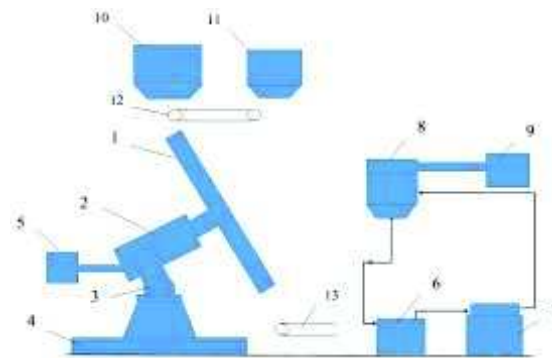


Рис. 1 – Схема установки гранулювання фосфогіпсу: 1 – тарілка; 2 – електродвигун; 3 – обладнання для регулювання кута нахилу тарілки; 4 – опорна рама; 5 – регулятор напруги; 6 – ємність для водного розчину; 7 – насос-дозатор; 8 – дисковий розпилювач; 9 – блок живлення; 10 – дозатор фосфогіпса; 11 – дозатор вапна; 12 – транспортер вихідного матеріалу; 13 – транспортер готових гранул

При експериментах у періодичному режимі роботи обладнання вихідна навіска фосфогіпса подавалась з бункера 10 через транспортер 12 у тарілку 1 гранулятора. Водний розчин подавався безупинно з ємності 6 за допомогою насоса-дозатора 7 через дисковий розпилювач 8 на поверхню шару протогранул фосфогіпса, що знаходяться у русі. Вапно з бункера 11 подавалось з дозатора 12. У ході процесу періодично відбиралися проби для ситового аналізу.

Режими гранулювання (час, кут нахилу й швидкість обертів тарілки) фіксували для кожної серії дослідів. Їх підбирали залежно від співвідношення рідка фаза : тверда фаза. Співвідношення  $r : t$  при змочуванні порошку варіювали так, щоб загальна вологість фосфогіпсу була оптимальною для отримання сферичних гранул з діаметром 1-7 мм. Порошок фосфогіпсу змочували водним розчином з додаванням гідратного вапна в кількості 3–6% від маси фосфогіпса (по сухій речовині).

Для зволоження фосфогіпсу використовували водний розчин  $MnSO_4$  (2-4 мас. %). Вибір саме цієї солі обумовлений тим, що вона є однією з необхідних для розвитку бактеріальної культури речовин, а у зразках відвального фосфогіпсу, що брався із відвалу ВАТ «Суміхімпром», мангану не виявлено або виявлено у низькій кількості (менше 0,0001 мас.%).

Дозу добавки вапна корегували в залежності від біологічних показників розвитку бактеріального матриксу на поверхні гранул, таким чином, щоб його розвиток становив не менше  $10^9$  КУО/г, що обумовлено стандартними характеристиками процесу біологічного очищення.

Отримані при гранулюванні гранули обережно переносили в ексикатор для набору ними міцності (до 8–9 кг/см<sup>2</sup>) і підсушування до вологості 10%. Ситовий аналіз включав підрахунок числа гранул з певними розмірами й вимір масової частини різних фракцій

гранул. Вимір площі поверхні й пористості гранул проводився методом капілярної конденсації азоту на аналізаторі сорбції газів Quantachrome NOVA 4200e.

Міцність гранул одного розміру (кг/см<sup>2</sup>) визначали по зусиллю, яке необхідно докласти для їх роздавлювання при стисненні. При цьому брали середню величину, отриману в результаті 10 паралельних вимірювань.

#### Лабораторне дослідження процесу розвитку бактеріального матриксу на гранулах фосфогіпсу.

Середовище для культивування мало наступний склад: NH<sub>4</sub>Cl, 1,0г; K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 0,6 г; CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, 0,2 г; FeCl<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O, 0,02 г; ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 40 мг; CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, 80 мг; MnSO<sub>4</sub>, 15 мг; дистильованої води, 1000 мл; рН, 5,0. Ідентифікація культур проводилась по визначнику Бергі на основі даних по морфології, фізіології та по біохімічним властивостям мікробних клітин.

Дослідження форми та клітинної структури виконували на трансмісійному електронному мікроскопі ЕМВ 100АК (НВО «Електрон», Суми, Україна).

Статистична обробка результатів здійснювалась в програмі MS Excel. Математична обробка результатів експериментів проводилась за допомогою пакета програми Statistica 6.0.

### Результати та їх обговорення

**Визначення оптимального середнього розміру гранул з урахуванням особливостей розвитку біоплівки.** Відповідно до завдання дослідження і напрямку використання фосфогіпсових гранул оптимізація їх розміру повинна здійснюватися на основі визначення глибини проникнення бактеріального матриксу.

Для процесу очищення від сполук сірки газових потоків використовують аеробні групи сіркоокислюючих бактерій, до яких окрім облигатних аеробів, також відносять види бактерій, що можуть здійснювати метаболічну активність і при зниженій концентрації кисню, і тих, що не гинуть при його відсутності (факультативні аероби). При цьому мінеральні компоненти фосфогіпсу (кальцій, фосфор, сірка, калій, магній і т.д.) можуть використовуватися також як аеробними, так і анаеробними мікроорганізмів різних еколого-трофічних груп.

Відповідно важливим є визначення оптимального розміру гранул і обмеження діаметру гранул у відповідності до характеру розвитку тіобактерій для стимулювання їх домінування серед інших видів мікроорганізмів.

Отже, до оптимальних за розміром відносять гранули, навколо яких домінують аеробні групи сіркоокислюючих мікроорганізмів в процесі експлуатації гранул фосфогіпсу у біофільтрі.

У процесі утворення біоплівки на гранулах глибина проникнення бактеріального матриксу всередину гранул не перевищує 1,5-2,5 мм (рис. 2, 3).

При цьому відбувається біотрансформація компонентів фосфогіпсу. Зона анаеробного росту не повинна перевищувати 2,5 мм.

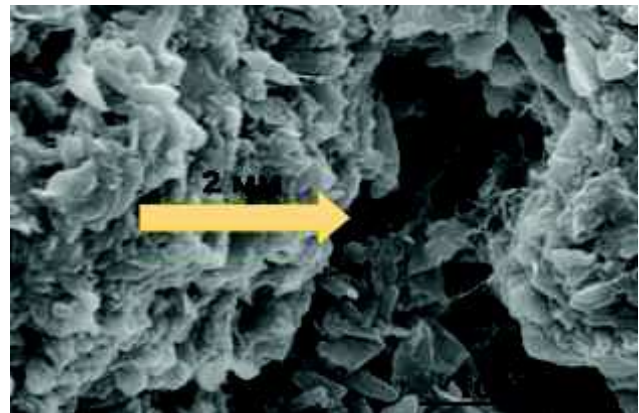


Рис. 2 – Мікрофотографія структури гранул фосфогіпсу після іммобілізації накопичувальної культури тіобактерій, збільш. 10 мкм: стрілкою вказана глибина проникнення бактеріального матриксу в гранулу

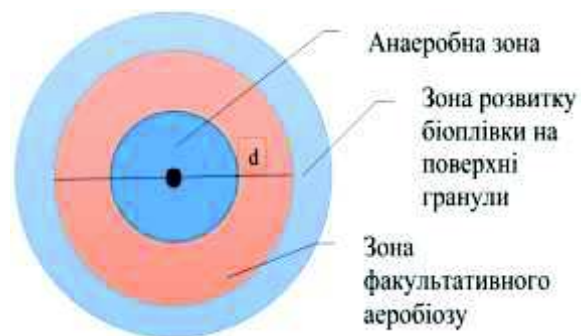


Рис. 3 – Схематичне зображення структури гранули із фосфогіпсу

Виходячи з вищевикладеного матеріалу, оптимальний розмір гранул можна визначити емпіричним шляхом за допомогою скануючої електронної мікроскопії фосфогіпсових гранул різного розміру з іммобілізованими на їх поверхні тіобактеріями. Відповідно оптимальний їх діаметр становить 4-5 мм (рис.2).

#### Визначення впливу часу гранулювання і вологості фосфогіпсу на процес гранулювання.

У процесі гранулювання спостерігалось зростання середнього розміру сферичних гранул при збільшенні часу в інтервалі 10-25 хвилин (рис. 4).

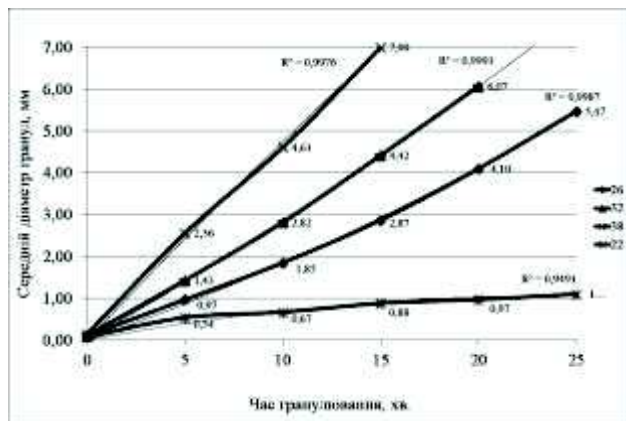


Рис. 4 – Середній діаметр гранул в залежності від часу гранулювання і вологості фосфогіпсу

Спостерігалась експоненційна залежність середнього розміру гранул від часу обробки, що узгоджується із припущенням про укрупнення часток в результаті злипання при грануляції вихідного дигідрата сульфату кальцію фосфогіпса з утворенням гранул, а також у результаті налипання часток за рахунок адгезійних сил.

При знаходженні оптимального поєднання таких факторів, як час гранулювання фосфогіпсу і значення його вологості, була побудована діаграма тривимірної поверхні (рис.5). Слід зауважити, що занадто велике зволоження (38%) призводить до збільшення відсотку утворення коржоподібних грудок, що прилипають до стінок тарілки, в той час як при вологості менше 22% гранули сферичної форми розміром більше 1 мм практично не утворюються.

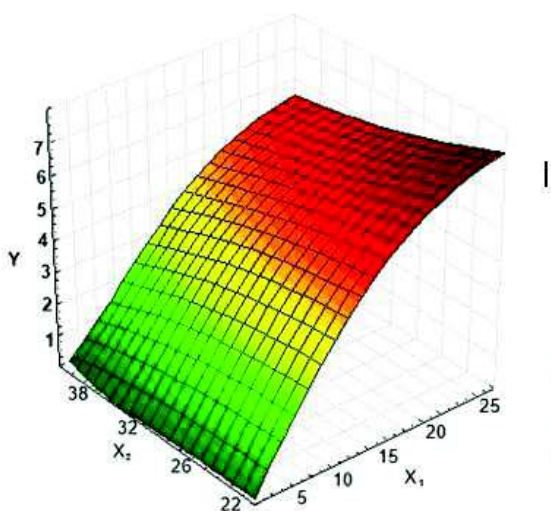


Рис. 5 – Діаграма залежності процесу гранулювання фосфогіпсу від часу обробки та вологості фосфогіпсу

За отриманими результатами (рис. 5) вплив факторів  $X_1$  (час гранулювання) та  $X_2$  (вологість фосфогіпсу в процесі обробки) на оптимізацію

процесу гранулоутворення ( $Y$ ) апроксимується рівнянням регресії:

$$M(Y) = 215,34 - 190,27X_1 + 65,21X_2 - 20,46X_1^2; \quad (1)$$

Коефіцієнт детермінації склав 0,9987, стандартна помилка оцінки – 0,2120;

Вплив солі біоактивного металу ( $MnSO_4$ ) на стійкість гранул наведена на рис. 6. При цьому було визначено, що оптимальним є внесення у водний розчин 3 мас. % сульфату марганцю (II), що дозволить забезпечити додаткове надходження поживних речовин для бактеріальної культури та незначно вплине на міцність гранул. При збільшенні масової частки цієї солі відбувалось зниження швидкості зміцнення гранул в ексикаторі.

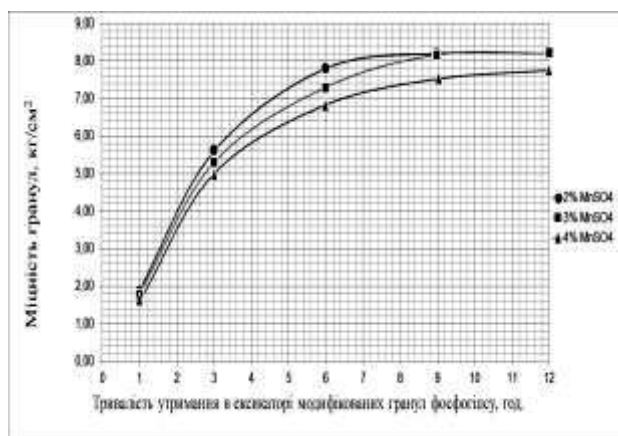
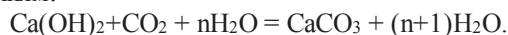


Рис. 6 – Залежність процесу зміцнення гранул фосфогіпсу від тривалості утримання при різній концентрації  $MnSO_4$

Найбільш оптимальний варіант гранул із діаметром 4-5 мм спостерігався при гранулюванні фосфогіпса з вологістю 32% при додаванні гідратного вапна в кількості 5% від маси фосфогіпсу й часу гранулювання 15 хв. Слід зауважити, що збільшення вмісту добавки вапна до 6 % і більше спричиняло зменшення рівня розвитку сіркоокислюючих бактерій на поверхні фосфогіпсових гранул на  $10^2$  КУО/г від оптимального значення. Можливо це пов'язано з утворення карбонатної плівки на поверхні гранул внаслідок процесу карбонізації гідроксиду кальцію за рівнянням:



Механізм взаємодії вапна і фосфогіпсу полягає в підвищенні гідрофобних властивостей гранул. В процесі грануляції відбувається ущільнення агрегатів фосфогіпсу під дією внутрішнього агрегатного кристалізаційного тиску та утворення з напівводного і одноводного гіпсу, що містяться в фосфогіпсі, кристалів дигідратного гіпсу, якими заростають пори і частково цементуються вже наявні в фосфогіпсі агрегати дигідрату сульфату кальцію.

Зауважимо, що низький вміст добавки на рівні 3-4% не дозволяє досягти необхідних фізико-хімічних процесів, описаних вище.

### Висновки

У роботі розглянуто процес грануляції фосфогіпсу та визначено оптимальну середню величину діаметру гранул дигідратного фосфогіпсу, що використовується в якості мінерального субстрата для імобілізації сіркоокислюючих бактерій в біофільтрі.

При дослідженні процесу розвитку бактеріального матриксу на отриманих гранулах фосфогіпсу виявлено, що до оптимальних за розміром можна віднести гранули, навколо яких домінують аеробні групи сіркоокислюючих мікроорганізмів в процесі експлуатації гранул фосфогіпсу у біофільтрі. Крім того, визначено оптимальні умови проведення процесу гранулювання. Досліджено напрямки модифікації гранул фосфогіпсу внесенням добавки із вапна та розчину сульфату мангану (II) для оптимізації необхідних фізико-хімічних та біохімічних властивостей гранульованого фосфогіпсу.

### Список літератури

1. **Малик, Н. Ю.** Двостадійна хімічна переробка фосфогіпсу в нітрат амонію / **Н. Ю. Малик, М. С. Мальований, Ю. О. Малик** // *Львівська політехніка*. – 2005. – С. 207 – 211.
2. **Манжина, С. А.** Использование крупнотоннажного отхода фосфогипса для снижения SO<sub>2</sub>-содержащих выбросов угольной теплоэлектростанции / **С. А. Манжина, В. В. Денисов, И. А. Денисова** // *Инженерный вестник Дона*. – 2014. – Выпуск №1, том 28. – С. 77–87.
3. **Булат, А. Ф.** Рентгенозахисні властивості фосфогіпсового в'язучого з рідкоземельним наповнювачем / **А. Ф. Булат, В. А. Іванов, К. С. Голов, Ю. В. Мисовець**. // *Науковий вісник Національного гірничого університету*. – 2010. – № 5. – С. 48–51.
4. **Пат. 88658.** Спосіб вилучення рідкісноземельних елементів із фосфогіпсу / **С. В. Власян, М. Д. Волошин** та інші // Бюл. № 6. – 2014р.
5. **Peelman, S.** Leaching of rare earth elements: past and present / **S. Peelman, Zhi H. I. Sun, J. Sietsma, Y. Yang** // *ERES 2014: 1st European Rare Earth Resources Conference. Milos*. – 04-07/09/2014.
6. **El-Didamony, H.** Treatment of phosphogypsum waste produced from phosphate ore processing / **H. El-Didamony, H. S. Gado, N. S. Awwad, M. M. Fawzy, M. F. Attallah** // *J Hazard Mater*. – 2013. – Vol. 244-245. – P. 596-602. – doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.10.053.
7. **Degirmenci, N.** Application of phosphogypsum in soil stabilization / **N. Degirmenci, A. Okucu, A. Turabi** // *Building and Environment*. – 2007. – Vol. 42, № 9. – P. 3393–3398. – doi:10.1016/j.buildenv.2006.08.010
8. **Фирсова, Л. П.** Замедление выщелачивания добавок биологически активных микроэлементов (Co, Cu, Mo) из гранулированного фосфогипса / **Л. П. Фирсова** // *Вестник Московского университета. Сер. 2, Химия*. – 2008. – Т. 49, N 4. – С. 270 – 273.
9. **Plyatsuk, L. D.** The Removal of Hydrogen Sulfide in the Biodesulfurization System Using Granulated

- Phosphogypsum / **L. D. Plyatsuk, Ye. Yu. Chernysh** // *Eurasian Chemico-Technological Journal*. – 2016. – Vol. 18, №1. – P.47–54. – doi: 10.18321/ectj395.
10. **Chernysh, Ye. Yu.** Opportunity of biochemical process for phosphogypsum utilization / **Ye. Yu. Chernysh, L. D. Plyatsuk** // *The Journal of Solid waste technology and managment, USA*. – 2016. – Vol.42, no 2. – P. 108–115. – doi: 10.5276/JSWTM.2016.108.
  11. **Черныш, Е. Ю.** Определение режимных параметров работы высоконагруженных систем биодесульфуризации с применением фосфогипса / **Е. Ю. Черныш, Е. Н. Яхненко** // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – №12 (1184). – С. 207 – 212. – doi: 10.20998/2413-4295.2016.12.31.

### Bibliography (transliterated)

1. **Malik, N., Malovaniy, M. and Malik, Yu.** Two-step chemical processing phosphogypsum to ammonium nitrate. *Lvivska politexnika*. 2005, 207-211.
2. **Manzhina, S., Denisov, V. and Denisova, I.** Using of large-scale waste phosphogypsum to reduce emissions of SO<sub>2</sub>-containing coal power plant. *Engineering Journal of Don*. 2014, 1 (28), 77–87.
3. **Bulat, A., Ivanov, V., Holov, K. and Mysovets Yu.** Radio-protective properties of phosphogypsum binding agent with rare-earth filler. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2010, 5, 48–51.
4. **Vlasyan, S., Voloshin, M.** Method of extracting rare earth elements with phosphogypsum. Declarative patent for utilities model. 2014, № UA 88 658, *Bull. Number 6*.
5. **Peelman, S., Sun, Zhi., Sietsma, J. and Yang., Y.** Leaching of rare earth elements: past and present. *1st European Rare Earth Resources Conference 04-07/09/2014*.
6. **El-Didamony, H., Gado, H. S., Awwad, N. S., Fawzy, M. M., Attallah, M. F.** Treatment of phosphogypsum waste produced from phosphate ore processing. *J Hazard Mater*. 2013, 244-245, 596-602, doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.10.053.
7. **Degirmenci, N., Okucu, A., Turabi, A.** Application of phosphogypsum in soil stabilization. *Building and Environment*. 2007, 42(9), 3393–3398, doi:10.1016/j.buildenv.2006.08.010.
8. **Firsova, L. P.** Slow leaching of biologically active additives microelements (Co, Cu, Mo) from granulated phosphogypsum. *Vestnik. Mosk. Univ. Ser. 2. CHEMISTRY*. 2008, 49(4), 270 – 273.
9. **Plyatsuk, L. D., Chernysh, Ye. Yu.** The Removal of Hydrogen Sulfide in the Biodesulfurization System Using Granulated Phosphogypsum. *Eurasian Chemico-Technological Journal*. 2016, 18 (1), 47–54, doi: 10.18321/ectj395.
10. **Chernysh, Ye. Yu., Plyatsuk, L. D.** Opportunity of biochemical process for phosphogypsum utilization. *The Journal of Solid waste technology and management, USA*. 2016, 42(2), 108–115, doi: 10.5276/JSWTM.2016.108.
11. **Chernish, E., Yakhnenko, E.** Determination of regime parameters of heavy loaded of bio-desulfurization system with phosphogypsum using. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, 12(1184), 207 – 212, doi: 10.20998/2413-4295.2016.12.31.

## Відомості про авторів (About authors)

**Черниш Єлизавета Юрївна** – кандидат технічних наук, Сумський державний університет (СумДУ), докторант, старший викладач кафедри прикладної екології Сумського державного університету, м. Суми, Україна, 40007; e-mail: [e.chernish@ssu.edu.ua](mailto:e.chernish@ssu.edu.ua)

**Chernysh Yelizaveta** – Candidate of Technical Sciences, doctoral student, senior lecturer in Department of Applied Ecology, Sumy State University (SSU), Sumy, Ukraine, 40007; e-mail: [e.chernish@ssu.edu.ua](mailto:e.chernish@ssu.edu.ua)

**Яхненко Олена Миколаївна** – Сумський державний університет (СумДУ), асистент кафедри прикладної екології Сумського державного університету, м. Суми, Україна, 40007; e-mail: [o.jakhnenko@ecolog.sumdu.edu.ua](mailto:o.jakhnenko@ecolog.sumdu.edu.ua)

**Yakhnenko Elena Nikolaevna** – assistant in Department of Applied Ecology, Sumy State University (SSU), Sumy, Ukraine, 40007; e-mail: [o.jakhnenko@ecolog.sumdu.edu.ua](mailto:o.jakhnenko@ecolog.sumdu.edu.ua)

**Пляцук Леонід Дмитрович** – доктор технічних наук, професор кафедри прикладної екології Сумського державного університету, Сумський державний університет (СумДУ), завідувач кафедри прикладної екології СумДУ, м. Суми, Україна, 40007, e-mail: [info@ecolog.sumdu.edu.ua](mailto:info@ecolog.sumdu.edu.ua)

**Plyatsuk Leonid Dmitrievich** – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of applied ecology of Sumy State University, Sumy State University (SSU), head of Department of applied ecology SSU, Sumy, Ukraine, 40007 ; e-mail: [info@ecolog.sumdu.edu.ua](mailto:info@ecolog.sumdu.edu.ua)

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Черниш, С. Ю.** Оптимізація процесу гранулювання фосфогіпсу для систем біодесульфуризації / **С. Ю. Черниш, О. М. Яхненко, Л. Д. Пляцук** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. № 42 (1214). – С. 217-222. – doi:10.20998/2413-4295.2016.42.35.

*Please cite this article as:*

**Chernysh, Ye., Yakhnenko, E. and Plyatsuk, L.** Optimization of the phosphogypsum granulation for bio-desulfurization systems. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, 42 (1214), 217–222, doi:10.20998/2413-4295.2016.42.35.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Черныш Е. Ю.** Оптимизация процесса гранулирования фосфогипса для систем биодесульфуризации / **Е. Ю. Черныш, Е. Н. Яхненко, Л. Д. Пляцук** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 42 (1214). – С. 217-222. – doi:10.20998/2413-4295.2016.42.35.

**АННОТАЦИЯ** В статье описана лабораторная модель процесса грануляции фосфогипса, определен оптимальный средний размер гранул минеральной загрузки из фосфогипса с учетом особенностей развития биопленки; исследована особенность процесса развития бактериального матрикса сероокисляющих бактерий на гранулах отвального дигидратного фосфогипса. Определены особенности влияния времени грануляции и влажности фосфогипса на процесс гранулирования, а также аппроксимованы уравнениями регрессии влияние данных факторов на оптимизацию процесса гранулообразования. Теоретически и экспериментально обоснован состав добавок для модификации гранул фосфогипса.

**Ключевые слова:** минеральный носитель; фосфогипс; грануляция; матрикс сероокисляющих бактерий.

*Надійшла (received) 09.12.2016*