

Оптимізація процесу сумісного перероблення бурового шламу та фосфогіпсу

І. Ю. Аблеева¹⁾

¹⁾ Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007

Article info:

Paper received:

01 March 2016

The final version of the paper received:

27 April 2016

Paper accepted online:

05 May 2016

Correspondent Author's Address:

¹⁾ i.ableyeva@ecolog.sumdu.edu.ua

Сумісна утилізація бурового шламу та фосфогіпсу з одержанням будівельного матеріалу є екологічно доцільною та економічно ефективною, оскільки сприяє не лише запобіганню забрудненню довкілля, а й вирішенню проблеми раціонального природокористування. Буровий шлам – відходи, що утворюється при бурінні нафтових свердловин, а фосфогіпс – відхід хімічної промисловості, що формується у результаті виробництва концентраційної фосфорної кислоти. Однак техногенна сировина містить важкі метали, які можуть переходити у готовий продукт та вилугуватися з нього.

Ідея автора полягає в оптимізації екологічної характеристики процесу перероблення бурового шламу та фосфогіпсу. Функцією мети була визначена концентрація важких металів в екстракті з гіпсобетону, що залежить, передусім, від структурно-технологічних параметрів.

Мета роботи – розв'язання задачі математичного програмування, тобто пошуку оптимального розв'язку значень факторів для процесу сумісного перероблення бурового шламу та фосфогіпсу.

Математичне програмування розв'язання задачі оптимізації екологічної характеристики гіпсобетону (мінімізація концентрації важких металів в екстракті) виконувалося методом простого випадкового пошуку у середовищі програмування Borland C++ мовою програмування Сі.

Установлено, що для мінімізації концентрації важких металів в екстракті з гіпсобетону необхідно дотримуватися знайдених значень таких факторів: масового співвідношення фосфогіпсового в'язучого до бурового шламу – 2,93 од., масової частки негашеного вапна від маси фосфогіпсового в'язучого – 0,09 од., віку гіпсобетону – від 19 дб, часу експозиції – 28 дб.

Ключові слова: перероблення промислових відходів, вторинна сировина, гіпсобетон, дифузія важких металів, математичне програмування, метод простого випадкового пошуку.

ВСТУП

На сьогодні процес утворення, накопичення та зберігання промислових відходів нафтогазового комплексу і хімічної промисловості становить досить істотну екологічну проблему, пов'язану із значним техногенним навантаженням на об'єкти довкілля. Зона впливу забруднювальних речовин - відходів - характеризується зростанням ризику для здоров'я та життя людини, попередження якого є пріоритетним завданням держави. Вирішення проблеми зниження екологічної небезпеки територій, безсумнівно, базується на зменшенні обсягів формування відходів та переробленні й утилізації накопичених відходів. При цьому досить перспективним способом поводження з такими видами промислових відходів, як буровий шлам і фосфогіпс, є безпосередньо нескладування та захоронення, а їх утилізація з повторним використанням. Питання підвищення ефективності та оптимізації технологічного процесу одержання кінцевого продукту при застосуванні цих відходів як вторинної мінеральної сировини з дотриманням вимог екологічної безпеки набуває дедалі більшої актуальності.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ПУБЛІКАЦІЙ

На цей час процес сумісного перероблення бурового шламу та фосфогіпсу з одержанням будівельно-

го матеріалу типу гіпсобетон мало досліджений.

У зв'язку з наявністю у цих відходах біогенних елементів фосфогіпс може застосовуватися як меліорант, хоча цей напрямок нерідко стримується для свіжих відходів, які характеризуються понаднормативною кількістю фторидів, оксиду фосфору та важких металів, вміст який зменшується з часом. Саме тому відомий та досліджений на практиці лише спосіб перероблення бурового шламу з використанням фосфогіпсу як компонента композиції, до складу якого також входять солома та органічне добриво [1]. Ця суміш вводиться до шламового амбару для нейтралізації та затвердіння відходів буріння шляхом прискорення біологічного розкладу органічних сполук. Однак цей спосіб дозволяє лише знешкодити та захоронити відходи, а не утилізувати їх.

Проблему нейтралізації кислотних залишків фосфогіпсу частково вирішує використання замість сирого фосфогіпсу відвальних відходів, оскільки відбувається зменшення концентрації домішок з часом. Вчені з Литви – А. Kaziliunas, S. Stonis, V. Leskeviciene та ін. - досліджували і довели ефективність застосування вапна як нейтралізувального реагенту [2, 3]. Нейтралізацію відвального фосфогіпсу проводять у процесі перероблення його на мінеральне в'язуче, яке за основними властивостями не відрізняється від природного гіпсового в'язучого [4]. Цей напрямок

утилізації фосфогіпсу є одним із найбільш перспективних, оскільки відповідає принципам раціонального природокористування та ресурсозбереження.

Виходячи із складу бурового шламу [5], його можна використовувати як дрібний заповнювач при виготовленні будівельної конструкції «гіпсобетон» на основі фосфогіпсового в'язучого. Таким способом реалізується технологія утилізації одних відходів за допомогою інших, що підвищує її економічну ефективність. Проте будівельні матеріали, виготовлені із техногенної сировини, повинні мати задовільні як технічні, так й екологічні характеристики. Більше того, у зв'язку з використанням вторинних мінеральних ресурсів необхідним є створення відповідних умов для одержання екологічно безпечного кінцевого продукту. Це завдання, але для інших відходів, вирішується у працях Н. П. Лукутцової [6–8]. Так, на основі математичного моделювання водно-міграційних процесів важких металів з бетону, при розв'язанні змішаної крайової задачі методом сіток, установлені особливості впливу структурно-технологічних факторів.

Однак для бурового шламу та фосфогіпсу зазначене питання практично не описується у літературних джерелах, що свідчить про низький рівень його вивчення.

Мета роботи полягає у розв'язанні задачі математичного програмування, тобто пошуку оптимального розв'язку значень факторів для процесу сумісного перероблення бурового шламу та фосфогіпсу.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

При реалізації запропонованого методу утилізації бурового шламу та фосфогіпсу [9] на останній стадії технологічного процесу у бетонозмішувачі формується гіпсобетонна суміш із таких компонентів: бурового шламу, фосфогіпсового в'язучого, вапняної суспензії та води. При цьому вміст зазначених складових може коливатися у заданих межах, що впливає як на технічні, так і на екологічні властивості виготовленого гіпсобетону. Технічна характеристика гіпсобетону визначається, передусім, міцністю при стисканні, а екологічна – ступенем дифузії важких металів із гіпсобетону, тобто концентрацією конкретного металу у водному екстракті.

Для знаходження оптимальних значень факторів, що впливають на зазначені характеристики, необхідно вирішити завдання оптимізації за такими послідовними етапами:

- 1) визначення мети (цілі);
- 2) складання списку вхідних та вихідних параметрів;
- 3) описання словами обмежень на параметри;
- 4) вираження мети та обмежень за допомогою математичних рівнянь та нерівностей.

Фізичний та математичний зміст дифузії важких металів (на прикладі міді) з гіпсобетону

При розміщенні зразка гіпсобетону у водне середовище відбувається вилуговування важких металів з твердого в рідину. Цей процес можна розділити у просторі та часі на дві стадії:

- 1) молекулярну дифузію важких металів всередині твердого тіла (гіпсобетону) до його поверхні;
- 2) масовіддачу важких металів – молекулярний

та конвективний переходи їх із поверхні розділу фаз у рідину.

Перехідним етапом є утворення дифузійного шару проміжної плівки розчину важких металів товщиною d з концентрацією C_T (рис. 1).

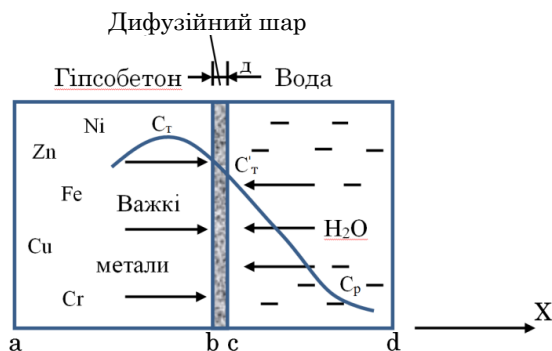


Рисунок 1 – Схема міграції важких металів за одновимірним стаціонарним режимом дифузії

У початковий момент часу при $t_0 = 0$ с концентрацію міді у твердій фазі беремо за $c_{T0} > 0$ г/кг, а у рідкій фазі $c_{p0} = 0$ г/кг. За рахунок цього виникає градієнт концентрації $\Delta c = c_T - c_p$, що є рушійною силою процесу вилуговування міді з твердої фази та її дифузії у рідку фазу.

Математичне відображення процесу дифузії полягає у вирішенні диференціального рівняння Фіка, що описує зміну у часі концентрації речовини, яка дифундує [10].

У випадку односпрямованої дифузії (відносно осі абсцис x) належить до параболічного типу і набуває вигляду [11]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (1)$$

де $c(x, t)$ – концентрація речовини у точці x у момент часу t ;

D – позитивна константа, що описує швидкість поширення речовини.

При дифузії із зразка гіпсобетону форми паралелепіпеда, який беремо за джерело кінцевої товщини, розміщене в площині $x = 0$ і містить кількість дифузванту M на одиницю площі, у зразок, де дифузвант початково був відсутній, розв'язок дифузії має вигляд [12]:

$$c(x, t) = \frac{M}{\sqrt{\pi Dt}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (2)$$

де M – маса дифузванту, кг;

D – коефіцієнт дифузії;

t – момент часу, с;

x – напрямок координатної осі.

Для цього випадку розв'язку рівняння дифузії задаємо, що коефіцієнт дифузії D постійний і не залежить від концентрації речовини, яка дифундує, часу та координат. Але коефіцієнт дифузії D залежить від таких внутрішніх факторів: масового співвідношення гіпсового в'язучого до бурового шламу ($m_{ГВ}/m_{БШ}$), масової частки негашеного вапна

від маси гіпсового в'язучого ($m_{CaO}/m_{ГВ}$) та віку гіпсобетону (t). Таким чином, ці параметри будуть опосередковано впливати на концентрацію важких металів в екстракті з гіпсобетону.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

При оптимізації екологічної складової процесу сумісної утилізації бурового шламу та фосфогіпсу параметром оптимізації є ступінь дифузії важких металів з гіпсобетону в довкілля, тобто концентрація важких металів в екстракті.

З метою дотримання вимог екологічної безпеки зазначену функцію цілі необхідно мінімізувати: $C \rightarrow \min$.

Згідно з формулою (2) маса дифузанта є константою, а коефіцієнт дифузії, момент часу та напрямок координатної осі – змінними. При цьому коефіцієнт дифузії є функцією, що залежить від інших змінних.

У зв'язку з цим задаємо такі вхідні параметри, тобто фактори, що варіюються:

- напрямок координатної осі – X_1 ;
- час експозиції гіпсобетону у середовищі, τ – X_2 ;
- масове співвідношення фосфогіпсового в'язучого, одержаного з фосфогіпсу відвального, до бурового шламу, $m_{ГВ}/m_{БШ}$ – X_3 ;
- масова частка негашеного вапна від маси фосфогіпсового в'язучого, $m_{CaO}/m_{ГВ}$ – X_4 ;
- вік гіпсобетону, t – X_5 ;
- коефіцієнт дифузії, D – X_6 .

Обмеження на параметри встановлювалися, виходячи з положень, наведених нижче.

Напрямок координатної осі залежить від геометричних розмірів зразка гіпсобетону (190x190x390 мм).

Максимальний час експозиції гіпсобетону у заданому середовищі визначається моментом встановлення рівноваги у системі «гіпсобетон – середовище». Рівноважна концентрація для важких металів, визначена розрахунковим способом, становить у середньому близько 20–30 дб.

Масове співвідношення гіпсового в'язучого до бурового шламу з експлуатаційно-технічних причин повинно бути не менше ніж 0,5 од., а з економічних – не більше ніж 3,5 од.

При масовій частці негашеного вапна від маси гіпсового в'язучого більше ніж 0,2 од. різко погіршуються міцнісні характеристики гіпсобетону, що перешкоджає вирішенню поставленого завдання оптимізації з досягненням екологічного ефекту, а також подальшому використанню продукту утилізації за цільовим призначенням.

Із віком гіпсобетону як фактором, що впливає на ступінь іммобілізації важких металів бурового шламу в утвореному гіпсобетоні, безпосередньо пов'язана його міцність, яка поступово зростає з моменту замішування гіпсобетонного тіста, набуваючи максимального значення на 28-му добу, після чого залишається на сталому рівні.

Виразимо задані обмеження на параметри у вигляді таких математичних нерівностей:

$$\begin{cases} 0,001 \leq X_1 \leq 20; \\ 1 \leq X_2 \leq 31; \\ 0,5 \leq X_3 \leq 3,5; \\ 0 \leq X_4 \leq 0,2; \\ 1 \leq X_5 \leq 31. \end{cases}$$

Змінна X_6 (коефіцієнт дифузії D) залежить від змінних X_3 , X_4 та X_5 ($X_6 = f(X_3, X_4, X_5)$) і описується таким рівнянням

$$X_6 = \frac{k_1}{X_3^2} + (X_4^2 - 0,2 \cdot X_4 + 0,01) + (0,04 \cdot e^{-0,4 \cdot X_5}), \quad (3)$$

де k_1 – константа (згідно з експертною оцінкою $k_1 = 0,01$).

Функція цілі (концентрація важких металів в екстракті) залежить від параметрів X_1 , X_2 , X_6 та виражається рівнянням

$$F(X_1, X_2, X_6) = \frac{m_1}{\sqrt{\pi \cdot X_6 \cdot X_2}} \cdot \exp\left(-\frac{X_1^2}{4 \cdot X_6 \cdot X_2}\right), \quad (4)$$

де m_1 – маса дифузанта у зразку, кг.

Математичне програмування розв'язання задачі оптимізації екологічної характеристики гіпсобетону (мінімізація концентрації важких металів в екстракті) виконувалося методом простого випадкового пошуку у середовищі програмування Borland C++ мовою програмування Сі.

Реалізація програми передбачає спочатку введення значень констант, нижніх та верхніх меж заданих шести змінних, однак їх можна прописати в листингу. Потім відбувається генералізація N разів випадкових значень факторів, що дозволяє обрахувати змінну X_6 , а також зазначену функцію цілі за рівняннями (3) та (4) відповідно.

У результаті роботи програми були знайдені такі оптимальні значення факторів, за яких стає можливим мінімізувати дифузію важких металів з гіпсобетону:

- напрямок координатної осі, $X = 16 \cdot 10^{-2}$ м;
- час експозиції гіпсобетону у середовищі, $\tau = 28,69$ доби;
- масове співвідношення фосфогіпсового в'язучого $m_{ГВ}/m_{БШ} = 2,93$ од.;
- масова частка негашеного вапна від маси фосфогіпсового в'язучого, $m_{CaO}/m_{ГВ} = 0,09$ од.;
- вік гіпсобетону, $t = 19$ дб.;
- коефіцієнт дифузії, $D = 0,0012$.

Таким чином, під час приготування гіпсобетонної суміші та подальшої експлуатації виготовленого гіпсобетону необхідно дотримуватися одержаних значень зазначених параметрів.

ВИСНОВКИ

Сумісне перероблення бурового шламу та фосфогіпсу з одержанням будівельного матеріалу типу гіпсобетон дозволяє вирішити досить важливу екологічну проблему – поводження з промисловими відходами. Однак, незважаючи на перспективність використання вторинних мінеральних ресурсів із позиції принципів ресурсозбереження, техногенна сировина не завжди є екологічно безпечною.

У роботі була зроблена спроба оптимізації процесу утилізації бурового шламу та фосфогіпсу з точки

зору екологічних властивостей кінцевого продукту. Екологічність визначалася ступенем дифузії з гіпсобетону важких металів як основних забруднювальних речовин відходів. Тому концентрація металів у витяжці і становила функцію мети, а її мінімізація – параметр оптимізації. При цьому були встановлені фактори, що впливають на функцію мети, серед яких окрему групу складали внутрішні параметри, пов'язані із складом гіпсобетонної суміші.

Математичне програмування розв'язання задачі пошуку оптимального розв'язку для заданої функції мети проводилося методом простого випадкового пошуку мовою програмування Сі у середовищі

програмування Borland C++.

Таким чином, встановлено, що для мінімізації концентрації важких металів в екстракті з гіпсобетону необхідно дотримуватися знайдених значень таких факторів: масового співвідношення фосфогіпсового в'язучого до бурового шламу – 2,93 од., масової частки негашеного вапна від маси фосфогіпсового в'язучого – 0,09 од., віку гіпсобетону – від 19 діб, часу експозиції – 28 діб.

Одержані результати стосуються конкретного бурового шламу та фосфогіпсу відвального.

Optimization of joint recycling process of drilling sludge and phosphogypsum

I. Yu. Ablieieva¹⁾

¹⁾ *Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., Sumy, Ukraine, 40007*

Joint recycling of drilling sludge and phosphogypsum with obtaining a building material is environmentally appropriate and cost-effective, as it helps not only to prevent environmental pollution, but also to solve the problem of rational nature management. Drilling sludge is a waste formed during drilling oil wells, and phosphogypsum is a waste of the chemical industry, formed as a result of the production of concentrational phosphoric acid. However, technogenic raw materials contain heavy metals that can be transformed into a finished product and leached out of it. The problem of minimizing the negative impact of pollutants is very important to reduce the risk to human health.

The author's idea is to optimize ecological characteristics of drilling waste and phosphogypsum recycling process. The concentration of heavy metals in the extract of gypsum concrete was determined as the function of the target which depends primarily on structural and technological parameters.

The purpose of the article is solution to mathematical programming task, i.e., finding optimal solutions for the factors values of drilling sludge and phosphogypsum recycling process.

Mathematical programming solution to optimization problem of the gypsum concrete environmental characteristics (to minimize concentration of heavy metals in the extract) was performed by the method of simple random search in the Borland C++ programming environment using C programming language.

It is necessary to observe the values of such factors to minimize concentration of heavy metals in the extract of gypsum concrete. The mass ratio of gypsum binder and drilling sludge is 2.93 units, the mass ratio of quick lime and gypsum binder is 0.09 units, the age of gypsum concrete is above 19 days, exposure time is 28 days.

Keywords: recycling of industrial wastes, secondary raw materials, gypsum concrete, diffusion of heavy metals, mathematical programming, simple random search method.

Оптимизация процесса совместной переработки бурового шлама и фосфогипса

И. Ю. Аблеева¹⁾

¹⁾ *Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, Сумы, Украина, 40007*

Совместная утилизация бурового шлама и фосфогипса с получением строительного материала является экологически целесообразной и экономически эффективной, поскольку способствует не только предотвращению загрязнения окружающей среды, но и решению проблемы рационального природопользования. Буровой шлам – отход, образующийся при бурении нефтяных скважин, а фосфогипс – отход химической промышленности, формируется в результате производства концентрационной фосфорной кислоты. Однако техногенное сырье содержит тяжелые металлы, которые могут переходить в готовый продукт и выщелачиваться из него.

Идея автора заключается в оптимизации экологической характеристики процесса переработки бурового шлама и фосфогипса. Функцией цели была определена концентрация тяжелых металлов в экстракте из гипсобетона, что зависит, прежде всего, от структурно-технологических параметров.

Цель работы – решение задачи математического программирования, то есть поиска оптимального решения значений факторов для процесса совместной переработки бурового шлама и фосфогипса.

Математическое программирование решения задачи оптимизации экологической характеристики гипсобетона (минимизация концентрации тяжелых металлов в экстракте) выполнялось методом простого случайного поиска в среде программирования Borland C++ на языке программирования Си.

Установлено, что для минимизации концентрации тяжелых металлов в экстракте из гипсобетона необходимо соблюдать найденные значения таких факторов: массового соотношения фосфогипсового вяжущего к буровому шламу – 2,93 ед., массовой доли негашеной извести от массы фосфогипсового вяжущего – 0,09 ед., возраста гипсобетона – от 19 суток, времени экспозиции – 28 суток.

Ключевые слова: переработка промышленных отходов, вторичное сырье, гипсобетон, диффузия тя-

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пат. 48471 Україна, МПК (2001) E21B33/00. Спосіб виконання гідроізоляції амбарів-накопичувачів та захоронення відходів буріння при будівництві свердловини на нафту і газ / Зеленський І. І., Любченко В. Ф. ; заявник та патентовласник Товариство з обмеженою відповідальністю Науково-виробниче підприємство Імпульс-С – № 2001085956 ; заявл. 27.08.2001; опубл. 15.08.2002, Бюл. № 8. – 8 с.
2. Kaziliunas A. Calcium orthophosphates hydrates: formation, stability and influence on standard properties of portland cement / A. Kaziliunas // *Ceramics – Silicaty*. 2013. - Vol. 57, № 4, - P. 297-304.
3. Kaziliunas, A., Leskeviciene, V., Vektaris, V., & Valancius, Z. The study of neutralization of the dihydrate phosphogypsum impurities. *Ceramics – Silicaty* / A. Kaziliunas, V. Leskeviciene, V. Vektaris, Z. Valancius // 2006. - Vol. 50, № 3, - P. 178-184.
4. Пат. 36150 Україна, МПК (2006) C01B 25/00. Спосіб одержання гіпсового в'язучого з фосфогіпсу / Карпович Е. О., Вакал С. В., Золотарьов О. Е., Шарпов С. В., Соколович С. О. ; заявник та патентовласник Сумський державний науково-дослідний інститут мінеральних добрив і пігментів; Товариство з обмеженою відповідальністю УКРРОСГПС. – № u200807228 ; заявл. 26.05.2008 ; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 19. – 3 с.
5. Utilization of solid wastes in construction materials / Md. Safiuddin, M. Z. Jumaat, M. A. Salam, et al. // *International Journal of the Physical Sciences*. – 2010. - Vol. 13, № 5. P. 1952-1963.
6. Лукутцова Н. П. Получение экологически безопасных строительных материалов из природного и техногенного сырья : автореф. Дис. д-ра. техн. наук : 05.23.05 – Строительные материалы и изделия / Н. П. Лукутцова. – Белгород, 2005. – 42 с.
7. Лукутцова Н. П. Комплексная экологическая оценка сырья, строительных материалов и промышленных отходов / Н. П. Лукутцова // *Жилищное строительство*. – 2004. – № 7. – С. 22–23.
8. Лукутцова Н.П. Тяжелые металлы в строительных материалах, содержащих техногенное сырье / Н.П. Лукутцова // *Строительные материалы*. – 2004. – № 10. – С. 44–46.
9. Пат. 97529 Україна, МПК (2015.01) C02F 11/00. Спосіб утилізації бурового шламу з отриманням гіпсобетону / Аблєєва І. Ю., Пляцук Л. Д., Большанина С. Б., Аблєєв О. Г. ; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – № u 2014 08486 ; заявл. 25.07.2014 ; опубл. 25.03.2015, Бюл. № 6. – 4 с.
10. Лебедев К. А. Компьютерное моделирование диффузионно контролируемой твердофазной химической реакции / К. А. Лебедев, В. В. Приседский // *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. Серія: Хімія і хімічна технологія. – Донецьк, 2005. – Вип. 95. – С. 60–64.
11. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А. А. Самарский, А. П. Михайлов - 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 320 с.
12. Mehrer H. *Diffusion in Solids* / H. Mehrer. - New York : Springer, 2007.

REFERENCES

1. Zelenskyi, I. I., & Liubchenko, V. F. (2002) UA Patent No. 48471. Sposib vykonannya gidroizolyatsii ambariv-nakopychuvachiv ta zakhoronennia vidhodiv burinnia pry budivnytstvi sverdlovyny na naftu i gas [A method of waterproofing implementation of barns-storage and disposal of drilling waste in the construction of oil and gas wells]. Kiev: State Department of Intellectual Property [in Ukrainian].
2. Kaziliunas, A. (2013). Calcium orthophosphates hydrates: formation, stability and influence on standard properties of portland cement. *Ceramics – Silicaty*, 57, 4, 297-304.
3. Kaziliunas, A., Leskeviciene, V., Vektaris, V., & Valancius, Z. (2006). The study of neutralization of the dihydrate phosphogypsum impurities. *Ceramics – Silicaty*, 50, 3, 178-184.
4. Karpovych, E. O., Vakal, S. V., Zolotariov, O. E., Sharapov, S. V., & Sokolovych, S. V. (2008) UA Patent No. 36150. Sposib oderzhannia gipsovogo viazhuchogo z fosfogipsu [A method of producing gypsum binder from phosphogypsum]. Kiev: State Department of Intellectual Property [in Ukrainian].
5. Safiuddin, Md., Jumaat, M. Z., Salam, M. A., Islam, M. S. & Hashim, R. (2010). Utilization of solid wastes in construction materials. *International Journal of the Physical Sciences*, Vol. 13, 5, 1952-1963.
6. Lukutsova, N. P. (2005). Poluchenie ekologicheskii bezopasnykh stroitelnykh materialov iz prirodnogo i tekhnogennogo syria [Production of environmentally safe building materials from natural and technogenic raw materials]. Extended abstract of Doctor's thesis. Belgorod [in Russian].
7. Lukutsova, N. P. (2004). Kompleksnaia ekologicheskaiia otsenka syria, stroitelnykh materialov i

8. promyshlennykh otkhodov [Integrated ecological assessment of raw materials, building materials and industrial waste]. *Zhilishchnoe stroitelstvo – Housing construction*, 7, 22–23 [in Russian].
8. Lukutsova, N. P. (2004). Tiazhelyie metally v stroitelnykh materialakh, soderzhashchikh tekhnogennoe syrie [Heavy metals in the building materials which contain technogenic raw materials]. *Stroitelnye materialy – Building materials*, 10, 44–46 [in Russian].
9. Ablieieva, I. Yu., Pliatsuk, L. D., Bolshanina, S. B., & Ablieiev, O. G. (2015) UA Patent No. 97529. Sposib utylizatsii burovogo shlamu z otrymanniam gipsobetonu [A method of drilling sludge recycling with obtaining a gypsum concrete]. Kiev: State Department of Intellectual Property [in Ukrainian].
10. Lebedev, K. A., & Prisedskii, V. V. (2005). Kompiuternoe modelirovaniie diffuzionno kontroliruiemoi tverdogaznoi khimicheskoi reaktsii [Computer simulation of diffusion-controlled solid-state chemical reaction]. *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. Seria: Khimii i khimichna tekhnolohiia – Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: Chemistry and Chemical Engineering, 95, 60–64 [in Russian].
11. Samarskii, A. A., & Mikhailov, A. P. (2002). Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery [Mathematical modeling: Ideas. Methods. Examples]. (2d ed.). Moscow: FIZMATLIT [in Russian].
12. Mehrer, H. (2007). *Diffusion in Solids*. New York: Springer.

G