

**О. Р. БЕЛЯНСЬКА, М. Д. ВОЛОШИН, Д. М. КАЧАНОВ, Ю. А. КАЧАНОВА**

## **ВИРОБНИЦТВО БІОГАЗУ ТА КОМПЛЕКСНОГО ДОБРИВА З ТВЕРДИХ ПРОМИСЛОВО – ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ІЗ ДОДАВАННЯМ АКТИВНИХ ДОМІШОК**

Наведено дослідження впливу додавання активних домішок до анаеробно зброджуваної суміші твердих промислово – побутових відходів на динаміку та швидкість виходу біогазу методом регресійного аналізу та лабораторних досліджень. Визначено вплив факторів, що впливають на якість процесу анаеробного бродіння, зокрема динаміку та швидкість виходу біогазу за отриманими результатами. Методом регресійного аналізу встановлено вплив біологічно активних домішок, доданих до зброджуваної суміші твердих промислово – побутових відходів, на швидкість та динаміку виходу біогазу.

**Ключові слова:** анаеробне бродіння, біогаз, активні домішки, тверді побутові відходи.

Приведено исследование влияния добавления активных примесей к анаэробно сбраживаемой смеси твердых промышленно – бытовых отходов на динамику и скорость выхода биогаза методом регрессионного анализа и лабораторных исследований. Определено влияние факторов, которые влияют на качество процесса анаэробного брожения, в частности динамику и скорость выхода биогаза по полученным результатам. Методом регрессионного анализа установлено влияние биологически активных примесей, прибавленных к сбраживаемой смеси твердых промышленно – бытовых отходов, на скорость и динамику выхода биогаза.

**Ключевые слова:** анаэробное брожение, биогаз, активные добавки, твердые бытовые отходы.

The effect of adding active admixtures to the fermentation mixture of solid industrial waste on the dynamics and speed of biogas emission is studied using regression analysis and laboratory tests. The influence of the factors that affect the quality of the process of anaerobic fermentation in particular dynamics and biogas emission speed is determined by the results. The method of regression analysis is used to study the influence of the biologically active admixtures added to the fermentation mixture of solid industrial waste on the speed and dynamics of biogas emission. It is found that the most optimal is the process of fermentation of solid industrial waste with the addition of enzymes in the amount of 0,05 g per 1 kg of fermentation mixture, then the final emission of biogas is increased by 1,5 times for 1 kg of dry substance. A technology scheme of producing biogas and complex fertilizer from solid industrial waste with the addition of active admixtures is proposed.

**Key words:** anaerobically fermented, biogas, active additives, solid industrial waste.

**Вступ.** В останній час в Україні існує проблема накопичення побутових та промислових відходів виробництва, що несуть екологічну загрозу для населення. Однією з важливих задач є збереження і поліпшення стану довкілля.

Водночас існує енергетична залежність України від імпортованих енергоносіїв. Україна щорічно споживає близько 200 млн. т. умовного палива і належить до енергодефіцитних країн, покриває свої потреби в енергії на 53 % (в основному за рахунок кам'яного вугілля) та імпортує 75 % необхідного обсягу природного газу та 85 % сирової нафти і нафтопродуктів. Така структура паливно-енергетичного комплексу утворює залежність економіки України від країн-експортерів нафти і газу, що є загрозою для її енергетичної і національної безпеки. Тому актуальною задачею буде створення технології виготовлення біопалива, що дасть можливість посилити енергетичну незалежність України і створити перспективу для розвитку сільського господарства [1].

Використовуючи альтернативні джерела енергії, такі як сонячне випромінювання, вітер, біомаса, вторинні енергетичні ресурси, можна зменшити використання традиційних джерел енергії та зменшити техногенний вплив на довкілля.

Використання процесів анаеробного зброджування дозволяє отримувати біогаз, який можливо використовувати на власні потреби, або потреби виробництва, в якості електричної, теплової енергії. Також метод анаеробного бродіння дозволяє переробляти та знезаражувати побутові та промислові відходи, що накопичуються на сміттєзвалищах та є екологічною загрозою для довкілля. В роботах *Сачко В. В., Плахотника О. М., Бондаря І. Л., Ютиной А. С., Гольдфарба Л. Л.* говориться про екологічні аспекти використання процесів анаеробного бродіння в технології одержання біогазу. Основним показником якості процесу зброджування є динаміка та швидкість виділення біогазу. Чим вище швидкість виходу біогазу, тим якісніше проходить процес бродіння [2]. Додавання активних домішок до зброджуваної суміші дозволить отримувати біогаз в менший проміжок часу.

**Аналіз останніх досліджень.** Незважаючи на те, що останнім часом в Україні реалізується все більше проєктів з альтернативної енергетики, загальна частина використання відновлювальних джерел енергії не перевищує 2 % [3]. Використання біогазових технологій дозволяє вирішувати проблеми, пов'язані з утилізацією та переробкою великої кількості накопичених відходів. Переробка органічних речовин у відходах відбувається за рахунок життєдіяльності мікроорганізмів. Перевагами анаеробної переробки відходів є низька енерговитратність, одержання біогазу, а саме метану, в якості енергоносія, та отримання осаду після процесу бродіння, що може використовуватись в якості добрива. Недоліком процесу метанування є недостатньо ефективний процес переробки органічної сировини мікроорганізмами.

Найчастіше інтенсифікація процесу метанування в біореакторі здійснюється за рахунок підігріву та перемішування завантаженого субстрату [3]. Безперервне завантаження перероблюваної суміші дає можливість стабілізувати швидкість анаеробного розкладання субстрату, що зброджується, та забезпечується рівномірний вихід біогазу.

Перемішування осаду в біореакторах дозволяє забезпечити ефективне використання всього об'єму завантаженої суміші, виключає утворення кірки та «мертвих зон», сприяє покращенню газоутворення [4].

Результати досліджень [5] підтверджують можливість підвищення ефективності процесу метанового бродіння шляхом попередньої механічної обробки зброджуваної суміші, а саме шляхом диспергування. Цей метод дозволяє зменшити процес метанового бродіння до 20 діб, та збільшити кількість переробленої органічної частини.

Для підтримки концентрації необхідної кількості мікроорганізмів у зброджуваної суміші, застосовується рециркуляція, коли частина зброджених осадів повертається у завантажувальний бункер [6].

**Постановка задачі.** Дослідити вплив активних домішок, що додають до зброджуваної суміші, на кінетику та швидкість виходу біогазу. Методом регресійного аналізу та лабораторних досліджень визначити технологічні параметри процесу анаеробного бродіння твердих промислово – побутових відходів з додаванням активних домішок. Розробити принципову технологічну схему та визначити параметри технологічного режиму одержання біогазу та комплексного добрива на основі твердих промислово-побутових відходів.

**Математична модель і метод розрахунку.** Анаеробне зброджування проводили на лабораторній установці (рис. 1), що складалась з наступних частин: корпус внутрішньо теплоізолюваний, скляний циліндр для зброджування ємністю  $0,5 \text{ дм}^3$ , що герметично закритий кришкою, газовідводна трубка, газозбірник, мірний циліндр для вимірювання об'ємів витісненої біогазом води. Для підтримки постійної температури мезофільного режиму ( $38^\circ \text{C}$ ) зброджування використовували електричний нагрівач з терморегулятором, занурений у біореактор.

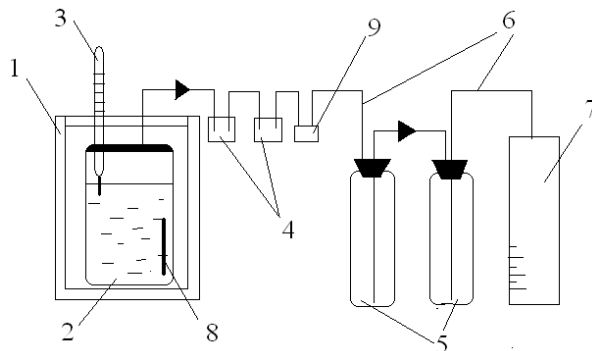


Рис. 1 – Схема лабораторної установки для одержання біогазу з твердих промислово - побутових відходів з додаванням активних домішок: 1 – корпус з внутрішньою теплоізоляцією; 2 – реактор для анаеробного бродіння; 3 – термометр; 4 – поглиначі вологи та  $\text{CO}_2$ ; 5 – газозбірники; 6 – газовідводна трубка; 7 – циліндр для збору витісненої води; 8 – електричний нагрівач з терморегулятором; 9 – пікнометр.

використовували наступну формулу:

$$V = \frac{m - m_{\text{п}}}{\rho - 1,2047 \text{ К}}, \quad (2)$$

де  $m$  – маса пікнометра із дистильованою водою, г;  $\rho$  – щільність дистильованої води ( $t = 20^\circ \text{C}$ ), що дорівнює  $998,078 \text{ кг/м}^3$ ;  $1,2047$  – щільність повітря ( $t = 20^\circ \text{C}$ ).

Виділення біогазу на протязі всього часу експерименту на всіх трьох установках проходило з різною швидкістю. Дані експерименту вказують на те, що після 18 доби проведення процесу анаеробного бродіння, виділення біогазу у другій і третій установці, до яких додавали активні домішки, виділення біогазу значно зменшувалось, отже подальше ведення процесу отримання біогазу недоцільне.

Процес зброджування на трьох установках проходив з різною швидкістю. На всіх установках максимальне виділення біогазу (на  $1 \text{ кг}$  сухої речовини) спостерігалось на одинадцять – чотирнадцять добу:  $0,067 \text{ дм}^3 / \text{доб}$  – на установці без додавання активних домішок (рис. 1, а);  $0,09 \text{ дм}^3 / \text{доб}$  – на установці з додаванням курячого посліду в якості активних домішок; (рис. 1, б);  $0,107 \text{ дм}^3 / \text{доб}$  – на установці із сумішшю з додаванням ферментного препарату (рис. 1, в). На 18 добу експерименту виділення біогазу на всіх трьох установках став у різному ступеню малим: менше ніж  $0,006 \text{ дм}^3 / \text{доб}$  – на установці без додавання активних домішок (рис. 1, а); менше ніж  $0,015 \text{ дм}^3 / \text{доб}$  – на установці з додаванням курячого посліду (рис. 1, б); менше ніж  $0,012 \text{ дм}^3 / \text{доб}$  – на установці з додаванням біологічно активних домішок (рис. 1, в).

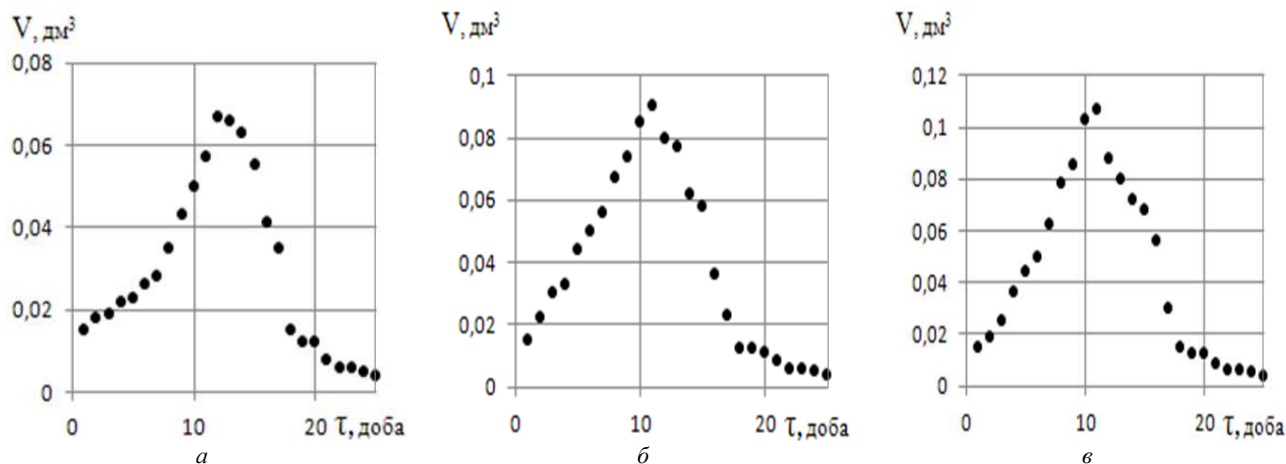


Рис. 2 – Динаміка виділення біогазу із зароджуваної суміші за часом в перерахунку на 1 кг сухої речовини: а – без додавання активних домішок; б – з додаванням курячого посліду; в – з додаванням біологічно активних домішок.

Встановлено, що для отримання максимальної кількості біогазу із зброджуваної суміші твердих промислово-побутових відходів з додаванням активних домішок достатньо 18 діб. Додавання біологічно активних домішок до зброджуваної суміші твердих промислово-побутових відходів дозволяє підвищити накопичення виходу біогазу та збільшити загальний об'єм одержаного біогазу в 1,5 рази, а саме з 0,54дм<sup>3</sup> до 0,73дм<sup>3</sup> на 1 кг сухої речовини. (рис. 3).

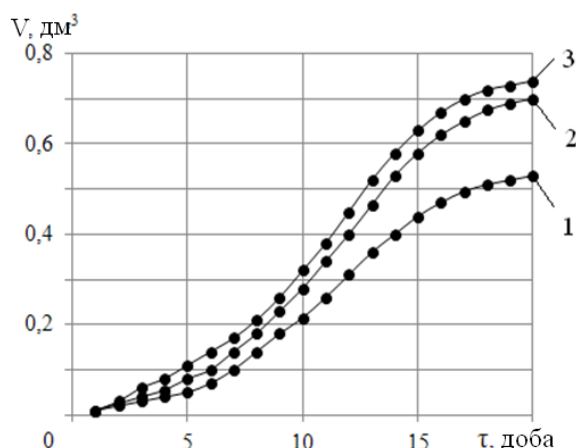


Рис. 3 – Кінетика накопичення біогазу від тривалості бродіння в перерахунку на 1 кг сухої речовини із суміші твердих промислово-побутових відходів: 1 – без додавання домішок; 2 – з додаванням курячого посліду; 3 – з додаванням біологічно активних домішок.

Результатом є рівняння, що описують процес накопичення біогазу за трьома установками:

а) без додавання активних домішок:

$$\hat{y} = 0,0003x^2 + 0,0252x - 0,0562, R^2 = 0,9763; \tag{3}$$

б) при додаванні курячого посліду в якості біологічно активних домішок:

$$\hat{y} = 0,0005x^2 + 0,0322x - 0,0695, R^2 = 0,9787; \tag{4}$$

в) при додаванні біологічно активних домішок:

$$\hat{y} = 0,0003x^2 + 0,0393x - 0,0736, R^2 = 0,9788. \tag{5}$$

Перший коефіцієнт рівняння визначає швидкість накопичення біогазу в залежності від часу. Аналіз побудованих моделей дозволяє стверджувати, що процес анаеробного бродіння твердих побутових відходів з додаванням біологічно активних домішок, зокрема ферментів *Amylase* та *Lipase* був найбільш оптимальним (рис. 3). Йому майже не поступається друга дослідна проба з додаванням курячого посліду. А найменш ефективним був процес анаеробного бродіння в третій установці без додавання біологічно активних домішок.

Отриманий біогаз на установках з використанням активних домішок високої якості. Він має щільність 1,2092м<sup>3</sup>/кг, приблизно 61 % метану, та 38 % діоксиду вуглецю, без врахування домішок інших газів, вміст яких не перевищує 1 %. Такі показники дозволяють використовувати цей газ в промислових та побутових умовах.

**Технологічна схема процесу.** На основі отриманих даних створено принципову технологічну схему виробництва біогазу та комплексного добрива на основі твердих промислово-побутових відходів (рис. 4), яку можна впровадити на базі очисних споруд з біологічним очищенням стічних вод або як самостійну установку для переробки промислово-побутових відходів.

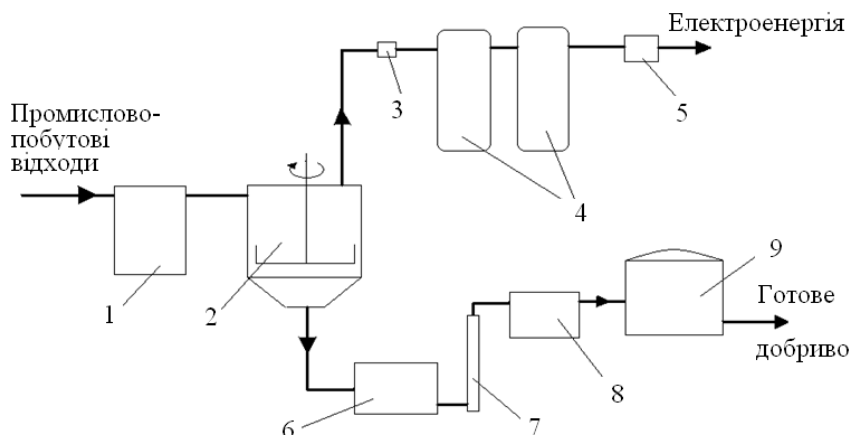


Рис. 4 – Принципова технологічна схема виробництва біогазу з твердих промислово-побутових відходів:  
1 – ділянка механічної обробки; 2 – біореактор; 3 – компресор; 4 – газозбірники; 5 – газогенератор; 6 – центрифуга;  
7 – елеватор; 8 – ділянка дозування та фасування комплексного добрива; 9 – склад готових добрив.

Принципова технологічна схема виробництва біогазу та комплексного добрива на основі твердих промислово-побутових відходів містить відділення механічної обробки 1, де відбувається подрібнення зброджувальної суміші у диспергаторі (тривалість обробки – 1 хв., критерій Рейнольдса  $4,49 \times 10^4$ , частота коливання рідини  $533 \text{ с}^{-1}$ ). Далі суміш завантажується в біореактор 2, в якому відбувається процес анаеробного бродіння відходів в мезофільному режимі протягом 18 діб. Для прискорення процесу метанування в біореакторі 2 додають активні домішки *Amylase* та *Lipase* в концентрації 0,05 г/кг або курячого посліду концентрацією 5 г/кг, що прискорюють період розкладання органічної речовини в зброджувальній суміші. По завершенні збродження утворену суміш подають до центрифуги 6 та елеватором 7 на ділянку 8 дозування та фасування комплексного добрива, після якої добрива вивантажуються на склад 9 готової продукції. Отриманий в результаті метанового бродіння біогаз, за допомогою компресора 3 перекачується в газозбірники 4. Після газозбірників біогаз подається на газогенератор 5, де за допомогою біогазу одержують електроенергію, яку можна використовувати на потреби виробництва.

**Перспективи подальших досліджень.** Перспективним є напрямок досліджень отримання комплексного добрива про утилізації промислово-побутових відходів при додаванні у якості біологічно активного компонента відходів харчової промисловості, що приведе до розширення сировинної бази добрив і знешкодження окремо взятих відходів харчової промисловості.

**Висновки.** Встановлено, що додавання біологічно активних домішок до анаеробно зброджувальної суміші промислово – побутових відходів дає позитивний результат, а саме прискорення процесу бродіння, що дозволяє зменшити тривалість процесу анаеробного бродіння з 50 до 18 діб. Додавання біологічно активних домішок *Amylase* та *Lipase* концентрацією 0,05 г на 1 кг сухої речовини збільшує кількість виділеного біогазу на 50 %. За отриманими результатами досліджень наведено математичний опис процесу анаеробного бродіння твердих промислово-побутових відходів з додаванням активних домішок. Для розроблення рекомендацій проведено порівняльний аналіз результатів досліджень побудованих моделей. Найбільш оптимальним є процес збродження твердих промислово-побутових відходів з додаванням ферментів, завдяки чому кінцевий вихід біогазу збільшується в 1,5 рази в перерахунку на 1 кг сухої речовини. Розроблено принципову технологічну схему одержання біогазу та комплексного добрива з твердих промислово-побутових відходів.

#### Список літератури

1. Гелетуха Г. Г., Железня Т. А., Жовмир Н. М., Матвеев Ю. Б. Оценка энергетического потенциала биомассы в Украине // Энергетические культуры, жидкие биотоплива, биогаз : Промышленная теплотехника. – 2011. – Т. 33. – № 1. – С. 57 – 64.
2. Белянская О. Р., Волошин М. Д., Кармазина В. В., Чунарьев О. В., Яцок М. В. Відходи виробництва і споживання та їх вплив на ґрунти і природні води. – К. : Київський університет, 2007. – 152 с.
3. Коваленко Г. Соціально-екологічні проблеми сьогодення // Соціальний захист. – 2001. – № 3. – С. 54 – 57.
4. Lubbecke S. Niedrig-Energie-Membransystem für die biologische Abwasserreinigung // Chem.-Ing.-Techn. – 2000. – № 5. – С. 521 – 525.
5. Белянская О. Р., Волошин М. Д., Кармазина В. В. Моделювання впливу попереднього диспергування в технології одержання комплексного добрива // Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2015. – № 6 (1115). – С. 12 – 20.
6. Ленке Пітер Пат. 4420111/7, Федеративна Республіка Німеччина. Спосіб біологічної очистки стічних вод / Пітер Ленке. – 1995.
7. Дорохов И. Н., Меньшиков В. В. Системный анализ процессов химической технологии. – М. : Наука, – 2005. – 583с.

## References (transliterated)

1. Geletukha G. G., Zheleznaia T. A., Zhovmir N. M., Matveev Yu. B. Otsenka energeticheskogo potentsiala biomassy v Ukraine [Assessment of the energy potential of biomass in Ukraine]. *Energeticheskie kultury, zhidkie biotopliva, biogas : Promyshlennaya teplotekhnika* [Energy crops, liquid biofuels, biogas: industrial thermal engineering]. 2011, no. 1, pp. 57–64.
2. Savits'kyy V. M., Khil'chevs'kyy V. K., Chunar'ov O. V. *Vidkhody vyrobnytstva i spozhyvannya ta yikh vplyv na grunt i pryrodni vody* [Industrial and consumption wastes and their impact on soil and natural water]. Kyiv, Kyivs'kyy universytet Publ., 2007, 152 p.
3. Kovalenko G. Sotsial'no-ekologichni problemy s'ogodennya [Modern social-and-ecological problems]. *Sotsial'nyy zakhyst* [Social protection]. 2001, no. 3, pp. 54–57.
4. Lubbecke S. Niedrig-Energie-Membransystem fur die biologische Awasserreinigung. *Chem.-Ing.- Techn.* 2000, no. 5, pp. 521–525.
5. Belyans'ka O. R., Voloshyn M. D., Karmazina V. V. Modelyuvannya vplyvu poperedn'ogo dysperguvannya v tekhnologiyi oderzhannya kompleksnogo dobryva [Modeling the influence of preliminary dispersing in the technology of complex fertilizer]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya : Matematychnе modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh* [Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies]. 2015, no. 6 (1115), pp. 12–20.
6. Lepke Piter. *Verfahren zur Abwasserreinigung in einer biologischen Klaranlage*. Patent FRG, no. 4420111/7, 1995.
7. Dorokhov I. N., Men'shikov V. V. *Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii* [System analysis of chemical technology processes]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 583 p.

Надійшла (received) 09.03.2017

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Виробництво біогазу та комплексного добрива з твердих промислово–побутових відходів із додаванням активних домішок / О. Р. Белянська, М. Д. Волошин, Д. М. Качанов, Ю. А. Качанова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 6 (1228). – С. 10 – 14. Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2222-0631.**

**Производство биогаза и комплексного удобрения из твердых промышленно–бытовых отходов с активными добавками / А. Р. Белянская, Н.Д. Волошин, Д. М. Качанов, Ю. А. Качанова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 6 (1228). – С. 10 – 14. Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2222-0631.**

**Producing biogas and complex fertilizer from solid industrial waste with active admixtures / O. R. Belianska, M. D. Voloshin, D. M. Kachanov, Ju. A. Kachanova // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2017. – № 6 (1228). – pp. 10 – 14. Bibliog.: 7 titles. – ISSN 2222-0631.**

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

**Белянська Олександра Ростиславівна** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри хімічної технології неорганічних речовин Дніпродзержинського державного технічного університету, м. Кам'янське; тел.: (097) 517-57-67; e-mail: belyans@ukr.net.

**Белянская Александра Ростиславовна** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры химической технологии неорганических веществ Днепродзержинского государственного технического университета г. Каменское; тел.: (097) 517-57-67; e-mail: belyans@ukr.net.

**Belyanska Olexandra Rostyslavivna** – Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer, Department of Chemical Technology of Inorganic Substances, Dneprodzerzhinsk State Technical University, Kamenskoe; tel.: (097) 517-57-67; e-mail: belyans@ukr.net.

**Волошин Микола Дмитрович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри хімічної технології неорганічних речовин Дніпродзержинського державного технічного університету, м. Кам'янське; тел.: (097) 517-57-67; e-mail: voloshin@ua.fm.

**Волошин Николай Дмитриевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры химической технологии неорганических веществ Днепродзержинского государственного технического университета, г. Каменское; тел.: (097) 517-57-67; e-mail: voloshin@ua.fm.

**Voloshin Nikolai Dmitrievich** – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Berdyansk State Polytechnic University, Berdyansk, tel.: (097) 517-57-67; e-mail: voloshin@ua.fm.

**Качанов Дмитро Михайлович** – магістрант кафедри хімічної технології неорганічних речовин Дніпродзержинського державного технічного університету, м. Кам'янське; тел.: (063) 118-86-16; e-mail: kachanov2010@i.ua.

**Качанов Дмитрий Михайлович** – магистрант кафедры химической технологии неорганических веществ Днепродзержинского государственного технического университета, г. Каменское; тел.: (063) 118-86-16; e-mail: kachanov2010@i.ua.

**Kachanov Dmytro Mykhaylovych** – Undergraduate, Department of Chemical Technology of Inorganic Substances, Dneprodzerzhinsk State Technical University, Kamenskoe; tel.: (063) 118-86-16; e-mail: kachanov2010@i.ua.

**Качанова Юлія Андріївна** – магістрант кафедри хімічної технології неорганічних речовин Дніпродзержинського державного технічного університету, м. Кам'янське; тел.: (093) 635-54-23; e-mail: kachanov2010@i.ua.

**Качанова Юлия Андреевна** – магистрант кафедры химической технологии неорганических веществ Днепродзержинского государственного технического университета, г. Каменское; тел.: (093) 635-54-23; e-mail: kachanov2010@i.ua.

**Kachanova Julia Andriyivna** – Undergraduate, Department of Chemical Technology of Inorganic Substances, Dneprodzerzhinsk State Technical University, Kamenskoe; tel.: (093) 635-54-23; e-mail: kachanov2010@i.ua.