

**Bibliography (transliterated):** 1. *Garnaev, A. Y.* (2001). Excel, VBA, Internet in economics and finance, 816. 2. *Zgurovsky, M. Z.* (2000). Introduction to computer information technology: Navch.posib. / M. Z. Zgurovsky, I. I. Kovalenko, V.M. Mihaylenko, 265. 3. *Gevorkian, G. H.* (1989). Basic is easy, 144. 4. *Yakushev, N. M.* (2001). Visual Basic for students, 232. 5. *Sleptsova, L. D.* (2004). VBA Programming. The tutorial, 384. 6. *Nazarov, C. V.* (2007). Programming in MS Office packages: Navch.posib. / C. V. Nazarov, P. P. Mel'nikov, L. P. Smolnikov, etc., 656. 7. *Horev, C. D.* (2001). Manual of VBA programming in Microsoft Office, 320. 8. *Kuzmenko, C.* (2003) VBA Programming 2002, 880. 9. *Cumming, Steve.* (2001). VBA for dummies.: TRANS. from English, 448. 10. *Glushakov, S. C.* (2008). Microsoft Excel 2007. Short course, 352.

*Надійшла (received) 10.12.2014*

**УДК 621.182.2.001.57**

**Є. Є. ЧАЙКОВСЬКА**, канд. техн. наук, с. н. с., доц., ОНПУ, Одеса;  
**Б. І. МОЛОДКОВЕЦЬ**, магістр, ОНПУ, Одеса;

## **ПІДТРИМКА ФУНКЦІОНУВАННЯ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ У СКЛАДІ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ**

Розроблено метод підтримки процесу зброджування, відвантаження збродженої сировини та завантаження свіжого матеріалу на рівні прийняття рішень. Прогнозування зміни температури зброджування дозволяє використовувати зброжене сушло в якості низькопотенційного джерела енергії для теплового насоса щодо встановлення температури теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник, вбудований в метантенк, при вимірюванні температури теплоносія, що гріє, на виході з теплообмінника.

**Ключові слова:** когенерація, електрична енергія, теплота, біогаз, зброджування, метантенк, тепловий насос, прийняття рішень

**Вступ.** Однією з переваг когенераційних технологій в умовах ресурса та енергозбереження є можливість використання біогазу як альтернативного джерела енергії [1]. Когенераційні технології, що мають у своєму складі первинний двигун, електрогенератор, систему утилізації теплоти, систему контролю й управління дозволяють включати в технологічні схеми різні енергетичні установки: поршневий двигун, газову турбін, парову турбін або комбінацію парової та газової турбін. Теплові насоси, що використовують у складі когенераційних систем, не мають зв'язку з виробництвом біогазу, не використовують зброжений матеріал у якості низькопотенційного джерела енергії, а виконують підтримку співвідношення виробництва електричної енергії та теплоти з використанням інших джерел енергії [2 – 4]. При виробництві ж біогазу зброжене сушло має енергетичний потенціал щодо можливості використання у якості низькопотенційного джерела енергії для теплового насоса, а на підтримку процесу зброджування витрачають до 20% – 30% виробленої енергії.

Умови когенерації при використанні біогазу ускладнені непостійним виходом біогазу, що вимагає додаткових баків для зброженої сировини, додаткових ємностей газгольдерів, значних витрат теплоти на підтримку процесу зброджування за рахунок виробленої енергії [5 – 7]. При безперервному

© Є. Є. ЧАЙКОВСЬКА, Б. І. МОЛОДКОВЕЦЬ, 2014

функціонуванні біогазової установки відвантаження збродженого сусла та завантаження свіжого матеріалу відбувається через 4-6 годин на добу. У зв'язку із залежністю температури свіжого сусла, що завантажують, від температури навколишнього середовища складно визначити точний термін виконання цього важливого елементу технологічного процесу виробництва біогазу. Більш того, підтримку процесу зброджування виконують з вимірюванням температури зброджування щодо зміни витрати свіжого сусла. Використання ж цієї оцінки ускладнено через значну теплову акумулюючу ємність сусла. Зміна витрати сусла може порушити необхідний баланс потоків свіжого і збродженого матеріалу для отримання постійного виходу біогазу, а використання зміни витрати теплоносія, що гріє може порушити активність процесу зброджування.

**Мета роботи.** Метою роботи є підтримка процесу зброджування, своєчасне відвантаження збродженої сировини та завантаження свіжого сусла для забезпечення постійного виходу біогазу в умовах когенераційної системи.

**Архітектура когенераційної системи.** На основі методологічного та математичного обґрунтування архітектури технологічних систем [8, 9] запропонована архітектура когенераційної системи, основою якої є інтегрована динамічна підсистема –

когенераційна установка, біогазова установка, тепловий насос, що використовує зброжене сусло у якості низькопотенційного джерела енергії та блоки розряду, заряду, оцінки функціональної ефективності (рис. 1).

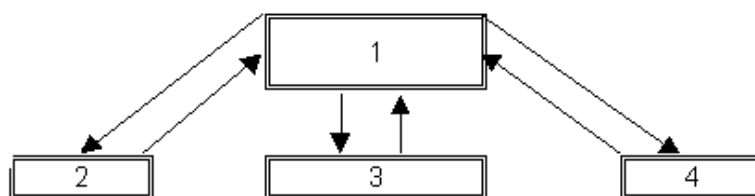


Рис. 1 – Архітектура когенераційної системи: 1 - динамічна підсистема (когенераційна установка, біогазова установка, тепловий насос); 2 - блок розряду; 3-блок заряду; 4 - блок оцінки функціональної ефективності

Математичне обґрунтування архітектури когенераційної системи:

$$CS = ((D(P(\tau)(x_0(\tau), x_1(\tau), x_2(\tau), f(\tau), K(\tau), y(\tau), d(\tau))), R(\tau), P(\tau))), R(\tau), (P_i(\tau)(x_1(\tau), f_i(\tau), K_i(\tau), y_i(\tau)))).$$

де  $CS$  - когенераційна система;  $D$  - динамічна підсистема;  $P$  - властивості елементів когенераційної системи;  $x$  - впливи;  $f$  - параметри, що діагностуються;  $K$ - коефіцієнти математичного опису;  $y$  - вихідні параметри;  $d$  - динамічні параметри;  $R$  - логічні відносини в  $CS$ ;  $\tau$ - час, с. Індекси:  $i$  - число елементів когенераційної системи; 0, 1, 2 - початковий стаціонарний режим, зовнішній, внутрішній характер впливів.

**Прийняття рішень на підтримку функціонування біогазової установки.** Запропоновано вимірювати температуру теплоносія, що гріє на виході з теплообмінника, вбудованого в метантенк, яка змінюється за часом раніше, ніж змінюється температура зброджування через значну акумулюючу ємність сусла. Зміну ж температури зброджування запропоновано оцінювати аналітично. Так, основою для здобуття діагностичної інформації як еталонної, так і функціональної є математична модель динаміки зміни температури зброджування. Згідно

методології математичного опису динаміки енергетичних систем як основи діагностики система диференціальних рівнянь включає рівняння стану як оцінку фізичної моделі біогазової установки, рівняння енергії передавального й сприймаючого середовищ, рівняння теплового балансу для стінки теплообмінника. Рівняння енергії сприймаючого середовища розроблено щодо істотного параметра, що діагностується – температури зброджування із представленням її зміни не тільки в часі, але й уздовж просторової координати осі теплообмінника вбудованого в метантенк, що співпадає з напрямком потоку руху середовища [8 – 9]. В результаті реалізації системи нелінійних диференціальних рівнянь отримана передатна функція за каналом: «температура зброджування – температура теплоносія, що гріє»:

$$W_{t-\theta} = \frac{K_3 \varepsilon (1 - L_3^*)}{L_B \beta \gamma} (1 - e^{-\gamma \xi}),$$

$$\begin{aligned} \text{де } K_3 &= \frac{m(\theta_0 - \alpha_0)}{G_{30}}; & \varepsilon &= \frac{\alpha_{30} h_{30}}{\alpha_{B0} h_{B0}}; & L_3^* &= \frac{1}{L_3 + 1}; & L_3 &= \frac{G_3 C_3}{\alpha_{30} h_{30}}; & L_B &= \frac{G_B C_B}{\alpha_{B0} h_{B0}}; & \beta &= T_M S + \varepsilon^* + 1; \\ T_M &= \frac{g_M C_M}{\alpha_{B0} h_{B0}}; & \varepsilon^* &= \varepsilon (1 - L_3^*); & \gamma &= \frac{(T_B S + 1) \beta - 1}{L_B \beta}; & T_B &= \frac{g_B C_B}{\alpha_{B0} h_{B0}}; & L_B &= \frac{G_B C_B}{\alpha_{B0} h_{B0}}; \\ \gamma &= \frac{(T_B S + 1) \beta - 1}{\beta}; & \xi &= \frac{z}{L_B}, \end{aligned}$$

де  $t$ ,  $\sigma$ ,  $\theta$  - температура зброджування, теплоносія, що гріє, стінки теплообмінника,  $K$ , відповідно;  $G$  – витрата речовини, кг/с;  $C$  – питома теплоємність, кДж/(кг·К);  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, кВт/(м<sup>2</sup>·К);  $h$  – питома поверхня, м<sup>2</sup>/м;  $g$  – питома маса речовини, кг/м;  $z$  – координата довжини теплообмінника, м;  $T_B$ ,  $T_M$  – постійні часу, що характеризують теплову акумулюючу здатність суслу, метала, с, відповідно;  $m$  – показник залежності коефіцієнта тепловіддачі від витрати;  $S$  – параметр перетворення Лапласа. Індокси: в – внутрішній потік - сусло, м – металева стінка, з – зовнішній потік - теплоносій, що гріє; 0, 1- початкові умови, вхід в теплообмінник, відповідно.

Розроблено комплексне моделювання динаміки біогазової установки та теплообмінника, вбудованого в метантенк, для визначення його конструктивних і режимних параметрів та встановлення рівнів зміни температури теплоносія, що гріє, на вході та на виході з теплообмінника. Використання комплексного моделювання та вимірювання реальної зміни температури теплоносія, що гріє, на виході з теплообмінника дозволяє здобути еталонні зміни температури зброджування та системи контролю працездатності та ідентифікації стану біогазової установки щодо підтримки процесу зброджування та виконання своєчасного відвантаження зброженого матеріалу і завантаження свіжого суслу з використанням теплового насоса [8–10]. Так, для підтримки температури зброджування на рівні 34<sup>°C</sup>-36<sup>°C</sup> встановлені наступні рівні функціонування біогазової установки щодо зміни температури теплоносія, що гріє на вході та на виході з теплообмінника, відповідно: перший рівень: 55<sup>°C</sup> -44,15<sup>°C</sup>; другий рівень: 52,1<sup>°C</sup>- 43,06<sup>°C</sup>; третій рівень: 49,9<sup>°C</sup>- 42,3<sup>°C</sup>; четвертий рівень: 47,5<sup>°C</sup> - 41,35<sup>°C</sup>; п'ятий рівень: 45<sup>°C</sup> -40,3<sup>°C</sup> (рис. 2).

На основі контролю працездатності та підтвердження стану інтегрованої динамічної підсистеми когенераційної системи з використанням метода графа причинно-наслідкових зв'язків [8, 9] можливо отримати таку підсумкову інформацію щодо оцінки зміни температури зброджування:

$$(CT_c(\tau)(\Delta t(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. верх.}}(\tau) < < \Delta t_{\text{розр. рів.}}(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. верх.}}(\tau) > 0)$$

чи таку:

$$(CT_c(\tau)(\Delta t(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. верх.}}(\tau) > > \Delta t_{\text{розр. рів.}}(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. верх.}}(\tau) < 1),$$

що надає можливість приймати рішення на розряд чи заряд біогазової установки, відповідно, на основі теплового насоса, що використовує у якості низькопотенційного джерела енергії відвантажене сусло:

$$(P(\tau)(\sigma_{\text{вх}}(\tau)(-)(+)), Z_{\text{сс}}(\tau).$$

Так, наприклад, при функціонуванні біогазової установки в першому рівні зменшення температури теплоносія, що гріє на виході з теплообмінника при розряді до 43,6°C, потребує прийняття рішення на зміну температури теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник до рівня 52,1°C щодо переходу на другий рівень функціонування біогазової установки для підтримки температури зброджування в межах 34°C–36°C (рис. 3). Здобута ж підсумкова інформація щодо оцінки зміни температури зброджування:

$$(CT_c(\tau)(\Delta t(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. верх.}}(\tau) \leq 0))$$

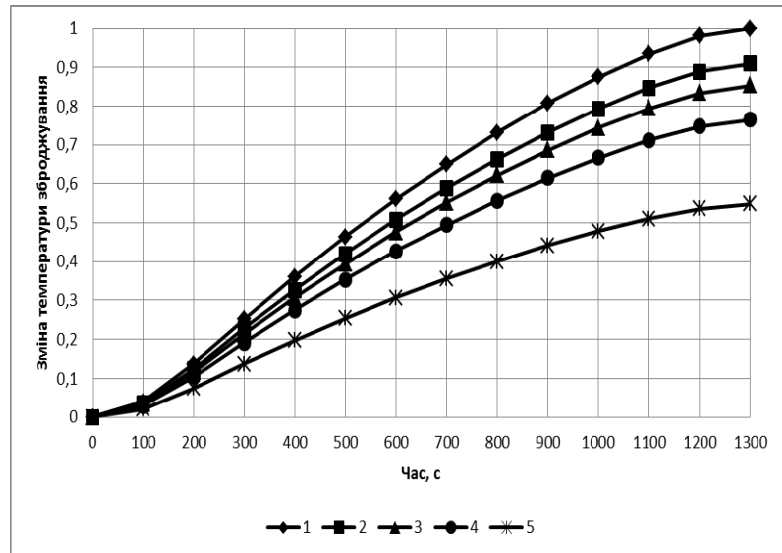


Рис. 2 – Еталонні динамічні характеристики температури зброджування для встановлених рівнів функціонування біогазової установки; 1, 2, 3, 4, 5 - еталони першого, другого, третього, четвертого, п'ятого рівнів функціонування, відповідно

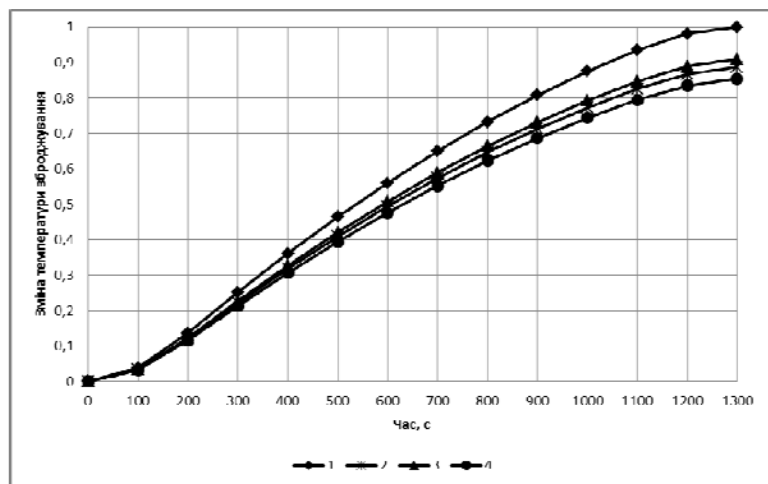


Рис. 3 – Зміна температури зброджування щодо переходу з першого рівня функціонування на другий рівень; 1 – еталон першого рівня; I, 2 – прийняття рішення та підтвердження нових умов функціонування, 3 – еталон другого рівня; 4 – еталон третього рівня

при функціонуванні біогазової установки в межах п'ятого рівня свідчить про неможливість підтримки температури зброджування від 34°C до 36°C, бо температура теплоносія, що гріє на виході з теплообмінника зменшилась до 37,04°C. Такі умови потребують прийняття рішення на відвантаження збродженого суслу (рис. 4).

Завершення процесу завантаження свіжого матеріалу відбувається при входженні температури зброджування в допуск першого рівня функціонування біогазової установки щодо здобуття наступної інформації:

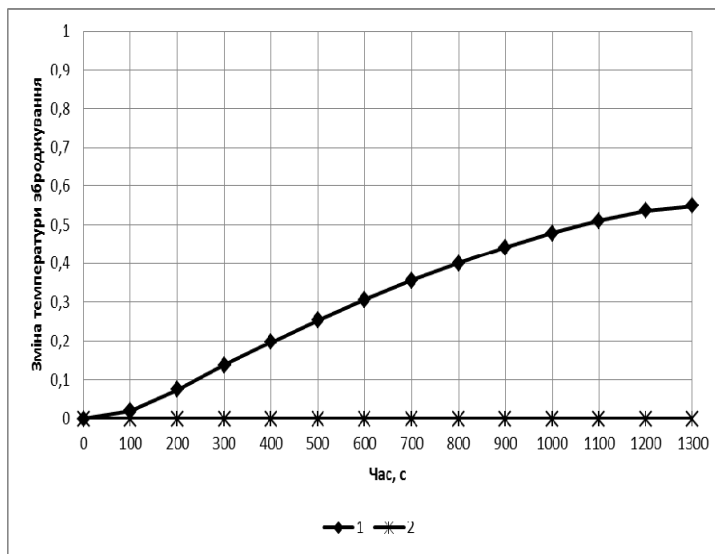


Рис. 4 – Зміна температури зброджування щодо відвантаження збродженого суслу; 1 – еталон п'ятого рівня функціонування; 2 – прийняття рішення на відвантаження та підтвердження нових умов функціонування

$$(CT_c(\tau)(\Delta t(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. верх.}}(\tau) \leq 1)),$$

тобто при підвищенні температури теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник до 55°C (рис. 5).

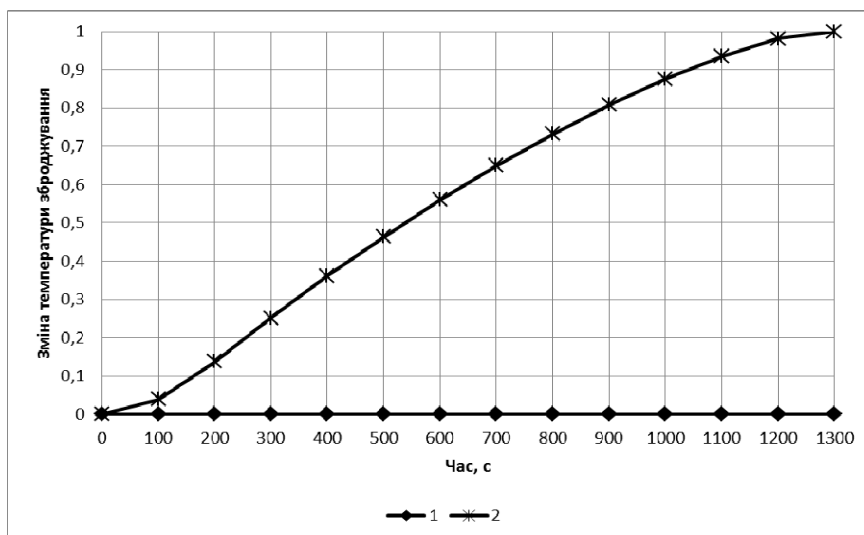


Рис. 5 – Зміна температури зброджування щодо завантаження свіжого матеріалу; 1 – прийняття рішення на завантаження свіжого матеріалу та ідентифікація нових умов функціонування; 2 – еталон першого рівня функціонування де  $CT$  – контроль події;  $P$  – властивості інтегрованої динамічної підсистеми;  $t$ ,  $\sigma$  – температура зброджування, теплоносія, що гріє, °C, відповідно;  $\tau$  – час, с. Індекси:  $c$  – контроль працездатності; гр. вх. – теплоносій, що гріє на вході в теплообмінник, вбудований в метантенк; розр. рів. - розрахункове значення температури зброджування рівня функціонування; ст., розр., верх. – стає, розрахункове значення температури зброджування першого рівня функціонування

**Висновки.** Розроблений метод підтримки функціонування біогазової установки на рівні прийняття рішень дозволяє, наприклад, при виробництві 352,5 м<sup>3</sup>/добу біогазу здобути економію біогазу 25,4 тис.м<sup>3</sup>/рік, що при підвищенні товарності біогазової установки на 13,94 % надає можливість в умовах когенераційної системи знизити собівартість виробництва електроенергії та теплоти в межах 20%–30 %.

**Список літератури:** 1. Железная, Т. А. Перспективы производства электрической энергии из биомассы в Украине [Текст] / Т. А. Железная, Е. Н. Олейник, А. И. Гелетуха // Промышленая теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 6. – С. 67–75. 2. Билека, Б. Д. Когенерационно - теплонасосные технологии в схемах горячего водоснабжения большой мощности [Текст] / Б. Д. Билека, Л. К. Гаркуша // Промышленная теплотехника. 2012. – Т. 34, № 4. – С. 52–57. 3. Билека, Б. Д. Экономичность когенерационных и комбинированных когенерационно-теплонасосных установок с газопоршневыми и газотурбинными двигателями [Текст] / Б. Д. Билека, Р. В. Сергиенко, В. Я. Кабков // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 7 (74). – С. 25–29. 4. Горобець, В. Г. Ексергетичний аналіз ефективності енергетичних систем для комплексного виробництва електричної та теплової енергії з використанням поновлювальних джерел енергії [Текст] / В. Г. Горобець, Б. Х. Драганов // Відновлювальна енергетика. – 2010. – № 3 (22). – С. 5–12. 5. Ратушняк, Г. С. Інтенсифікація теплообміну та термостабілізація біореакторів [Текст] / Г. С. Ратушняк, В. В. Дзеджула // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 2. – С. 26–31. 6. Ратушняк, Г. С. Автоматичне управління в системах біоконверсії [Текст] / Г. С. Ратушняк, В. В. Дзеджула // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 6. – С. 116–121. 7. Ратушняк, Г. С. Моделювання нестационарних режимів теплообміну в біогазових реакторах [Текст] / Г. С. Ратушняк, В. В. Дзеджула, К. В. Анохіна // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – № 2. – С. 142–145. 8. Чайковская, Е. Е. Оптимизация энергетических систем на уровне принятия решений [Текст] / Е. Е. Чайковская // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 7. – С. 169–173. 9. Чайковська, Є. Є. Технологічна система виробництва та споживання біогазу [Текст] / Є. Є. Чайковська // Восточно-Европейский журнал передових технологій. – 2014. – № 4/8 (70). – С. 50–57. 10. Молодковець, Б. І. Енергозберігаюча технологія виробництва біогазу на основі теплового насоса [Текст] Б. І. Молодковець // Матеріали Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузі “Електротехніка та електромеханіка”. Збірник рефератів робіт. - Дніпродзержинськ: ДДТУ. - 2014. – С. 16-18.

**Bibliography (transliterated):** 1. Geleznaia, T. A., Oleinic, E. N., Geletuha, A. I. (2013). Prospects for the production of electricity from biomass in Ukraine. *Industrial Heat*, 35 (6), 67–75. 2. Biliaka, V. D., Harkucha, L. K. (2012). Cogeneration, heat pump technology in hot water circuits of high power. *Industrial Heat*, 34(4), 52–57. 3. Biliaka, B. D., Sergienko, R. V., Kabkov, V. Y. (2010). Efficiency cogeneration and combined-heat pump systems with gas piston and turbine engine. *Aerospace equipment and technology*, 7(74), 25–29. 4. Horobets, V. G., Drahanov, B. H. (2010). Exergy efficiency analysis of power systems for integrated production of electricity and heat using renewable energy. *Renewable Energy*, 3 (22), 5–12. 5. Ratushniak, G. S., Dgedgula, V. V. (2006). Intensification of heat transfer and thermal stabilization of bioreactors. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnical Institute*, 2, 26–31. 6. Ratushniak, G. S., Dgedgula, V. V. (2006). Automatic control systems bioconversion. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnical Institute*, 6, 116–121. 7. Ratushniak, G. S., Dgedgula, V. V., Anohina, K. V. (2010). Simulation of unsteady heat transfer modes in biogas reactors. *Bulletin of the Khmelnytsky National University*, 2, 142–145. 8. Chaikovskaya, E. E. (2013). Optimization of energy systems at the level of decision-making. *Industrial Heat*, 35 (7), 169–173. 9. Chaikovskaya, E. E. (2014). Technological system of production and consumption of biogas. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/8 (70), 50–57. 10. Molodkovets B. I. (2014). Energy-saving technology for biogas production based on heat pump. *Proceedings of the All-Ukrainian competition of student research papers in the field of “Electrical and Electromechanics”*. Digest of abstracts of works. Dneprodzherzhinsk, DCTU, 6-18.

Надійшла (received) 15.12.2014