

УДК 536.24:631.371

Ткаченко С.Й.

Риндюк В.І.

Пішеніна Н.В.

Риндюк С.В.

Дишлюк С.В.

*(Вінницький національний технічний університет)*

## ТЕРМІЧНА І БІОТЕХНОЛОГІЧНА НЕСТАБІЛЬНІСТЬ В РЕАКТОРІ АНАЕРОБНОЇ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ

*Розглянуто проблему термічної та біотехнологічної стабілізації в реакторах біогазової установки. Запропоновано методику оптимізації параметрів системи термостабілізації реактора фермерських біогазових установок невеликої потужності та наведено приклад її застосування.*

*The problem of the thermal and biotechnological stabilizing is considered in the reactors of the biogas setting. Methodology of optimization of parameters of the system of термостабілізації of reactor of farmer biogas options of small power is offered and an example of her application is made.*

### **Вступ**

У будь-якому біотехнологічному процесі основну роль грає біологічний агент — мікроорганізми, його природа і фізіолого-технологічні властивості. Метаболічна активність та репродуктивна здатність мікроорганізмів залежать від температури [1]. Основним елементом біогазової установки (БГУ) є реактор анаеробної переробки відходів, в якому здійснюються біотехнологічні процеси.

Розрізняють чотири основних рівня характерних температур, при яких може виникати метанове бродіння в реакторах БГУ: психрофільний режим 12...20°C; мезофільний — 32...35°C; термотолерантний — 39...42°C; термофільний — 52...54°C [2]. Температура впливає на кількість газу, що можна отримати за визначений проміжок часу, на технологічний час ферментації, а також на склад і якість біогазу та отримуваних добрив. З підвищенням температура бродіння, збільшується кількість отриманого біогазу з одиниці об'єму в одиницю часу, а також зменшується час і покращується глибина процесу анаеробної переробки, що дозволяє суттєво зменшити матеріалоємність БГУ і, відповідно, негативний вплив на навколишнє середовище.

При різних температурних рівнях активізуються окремі класи анаеробних бактерій. У випадку переходу з одного рівня температур до іншого, відбувається зміна класу бактерій. В цей період спостерігається зменшення продуктивності установки по біогазу. Для стабільного розвитку і життєдіяльності бактерій, відхилення температури в реакторі БГУ від номінальної повинно не перевищувати 2,8°C [3]. Термостабілізація реактора БГУ забезпечується різними теплообмінними пристроями та відповідною теплоізоляцією.

Звичайні господарські та фермерські БГУ, робочий об'єм яких не перевищує 10...20 м<sup>3</sup>, як правило, обладнані вбудованим в реактор водяним теплообмінником і не забезпечені системою автоматизованого регулювання температури. В такому випадку, підтримання сталого температурного режиму відбувається вручну, шляхом підвищення температури гарячого теплоносія в теплообміннику. Цей спосіб має свої недоліки: можливість зниження активності бактерій внаслідок перегріву або недогріву вмісту реактора; можливість забруднення зовнішньої його поверхні і погіршення тепловіддачі та знищення бактерій в цій зоні у випадку раптового локального збільшення температури стінки теплообмінника; зниження коефіцієнта корисної дії та нестабільність роботи джерела теплової енергії, та інші.



змінною є температура субстрату в реакторі  $T$ . Сталими величинами приймаємо:  $\bar{Q}$ ,  $M$ ,  $c$ ,  $F$ ,  $R$ .

Необхідно дослідити як буде впливати нестабільність температурного режиму реактора, яка викликана зміною температури навколишнього повітря, на біотехнологічний процес в реакторі БГУ. При цьому вважаємо, що біотехнологічна стабільність в реакторі забезпечується, якщо відхилення температури в реакторі буде змінюватись в межах  $\pm 1,5^\circ\text{C}$  [3, 4].

### Основні дослідження

Система термостабілізації реактора фермерської БГУ простої конструкції складається із таких елементів: джерела теплової енергії (водогрійний котел), теплової ізоляції реактора та вбудованого в реактор трубчатого теплообмінника, яка характеризується такими параметрами — тепловою потужністю  $\bar{Q}$  осередненою з певний час (тепловиділення в реакторі) та значенням термічного опору ізоляції  $R_{\text{із}}$ .

Нами запропоновано методику оптимізації параметрів системи термостабілізації реактора фермерських БГУ невеликої потужності (рис. 1):

- будемо графік залежності зміни середньодобової температури зовнішнього повітря  $\bar{t}_{\text{доба}} = f(\tau)$  за певний період часу  $\Delta\tau_i$  та визначаємо середню температуру зовнішнього повітря  $\bar{t}$  за цей же період часу;
- в залежності від  $\bar{t}$  розраховуємо величини тепловтрат реактора БГУ  $Q_3$ , при різних варіантах вибору  $R_{\text{із}}$ ; приймаємо, що для кожного варіанту  $R_{\text{із}}$ ,  $\bar{Q} = Q_3$  за період  $\Delta\tau_i$ ;
- використовуючи рівняння (3) знаходимо відхилення температури в реакторі  $\Delta T$  за період  $\Delta\tau_i$ , приймаючи до уваги побудовану залежність  $\bar{t}_{\text{доба}} = f(\tau)$ ;
- зіставляємо розраховані значення відхилень  $\Delta T$  і остаточно вибираємо параметри теплоізоляції, при якій  $\Delta T$  не більше  $\pm 1,5^\circ\text{C}$ , та визначаємо рекомендований діапазон регулювання теплової потужності  $\bar{Q}$ , яку потрібно подавати в реактор для термостабілізації.

Рівняння (3) можна використовувати і для виконання перевірних розрахунків — визначити оптимальну потужність теплообмінника  $\bar{Q}$  протягом теплого періоду року, якщо задано значення  $R_{\text{із}}$ , при умові, що  $-1,5 \leq \Delta T \leq 1,5^\circ\text{C}$ .

Наведемо приклад застосування запропонованої методики. Приймаємо, що в реакторі БГУ об'ємом  $V=10 \text{ м}^3$  здійснюється анаеробна переробка суміші відходів великої рогатої худоби і свиней. Властивості суміші: вміст сухих речовин 0,12%; густина  $\rho_c = 1025 \text{ кг/м}^3$ ; теплоємність  $c = 3,94 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ . Середня в часі температура в реакторі дорівнює  $T = 35^\circ\text{C}$ , що відповідає мезофільному режиму роботи.

Аналізуючи результати спостережень зміни температури зовнішнього повітря 2005...2011 рр. [5], було відокремлено три періоди: опалювальний (грудень — лютий), міжопалювальний (квітень — жовтень) та перехідний (жовтень — листопад, березень — квітень).

Для проведення числових досліджень за опалювальний період виділяємо проміжок часу за 2010-2011 рр. з мінімальними значеннями  $\bar{t}_{\text{доба}}$  — місяць грудень 2010р. (рис. 2). Середня температура зовнішнього повітря за грудень дорівнює  $\bar{t} = -4,3^\circ\text{C}$ .

Згідно з методикою, за середньою температурою розраховуємо тепловтрати реактора  $Q_3$  і приймаємо величину тепловиділень всередині реактора  $\bar{Q} = Q_3$ . Значення термічного опору огорожувальної конструкції  $R$  визначалось за залежністю (2). Для числового експерименту було прийнято  $\alpha_1 = 23,8 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ ;  $\alpha_2 = 126 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ ;  $\lambda_{\text{із}} = 0,05 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;

$R_{i3} = 1; 2; 3 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/Вт}$  при  $\delta_{i3} = 0,05; 0,1; 0,15 \text{ м}$ , відповідно.

Впродовж місяця на реальному графіку [5] зміни середньодобової температури зовнішнього повітря виділяємо 12 характерних ділянок часу  $\Delta t$  (рис. 2), протягом яких температурна крива знаходиться: нижче (вище) рівня середньої температури за весь період (нижче  $-4,3^\circ\text{C}$ ) та визначаємо середню температуру на кожній ділянці  $t_{dt}$ . На рис.2 значення середніх температур кожної ділянки позначено горизонтальними відрізками 2. Коливання температури в реакторі  $T$  протягом кожної ділянки часу  $\Delta t$  в грудні 2010 р. графічно показано на рис.3, штриховими лініями позначено допустимі границі зміни  $T$ .

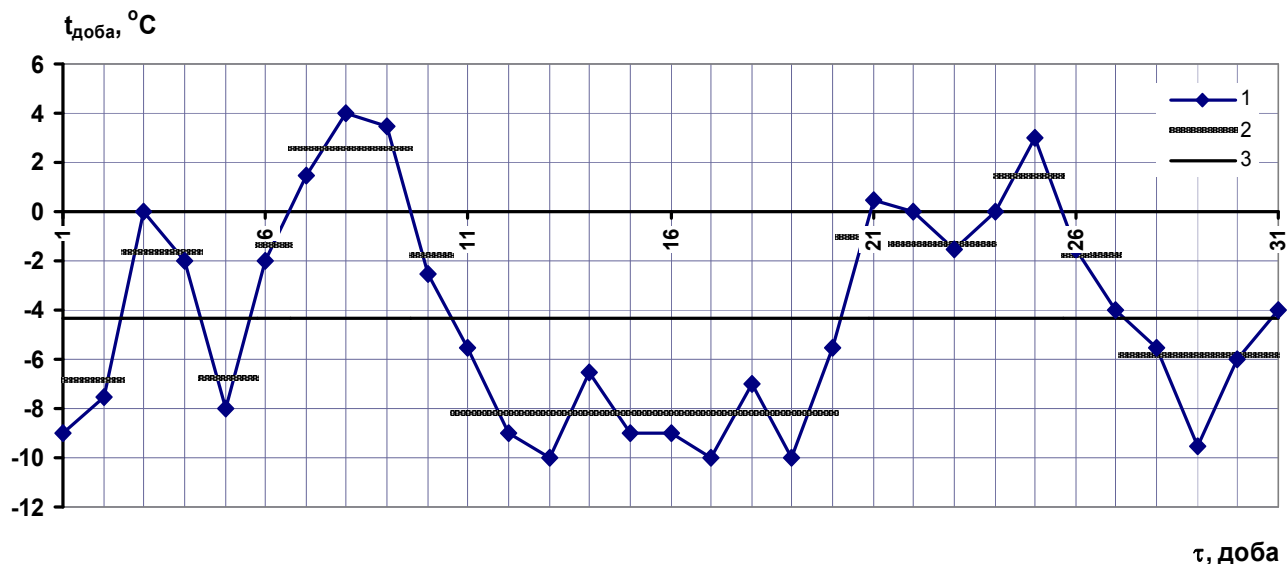


Рис. 2. - Залежність зміни середньодобової температури зовнішнього повітря  $t_{\text{доба}}$  за грудень: 1 – середньодобова температура; 2 – середня температура окремої ділянки періоду; 3 – середня температура всього періоду.

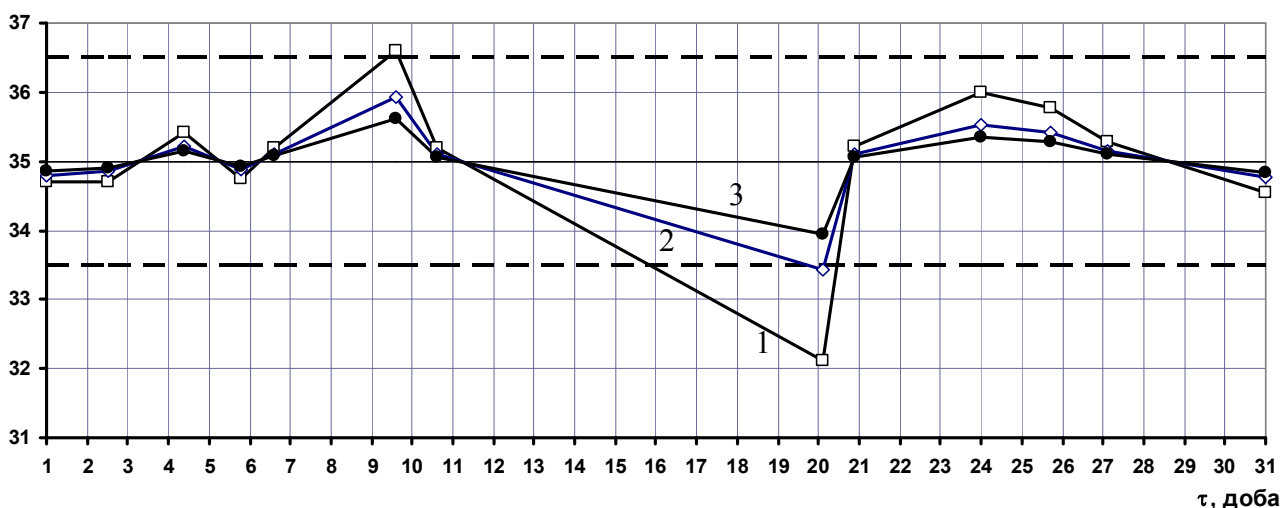


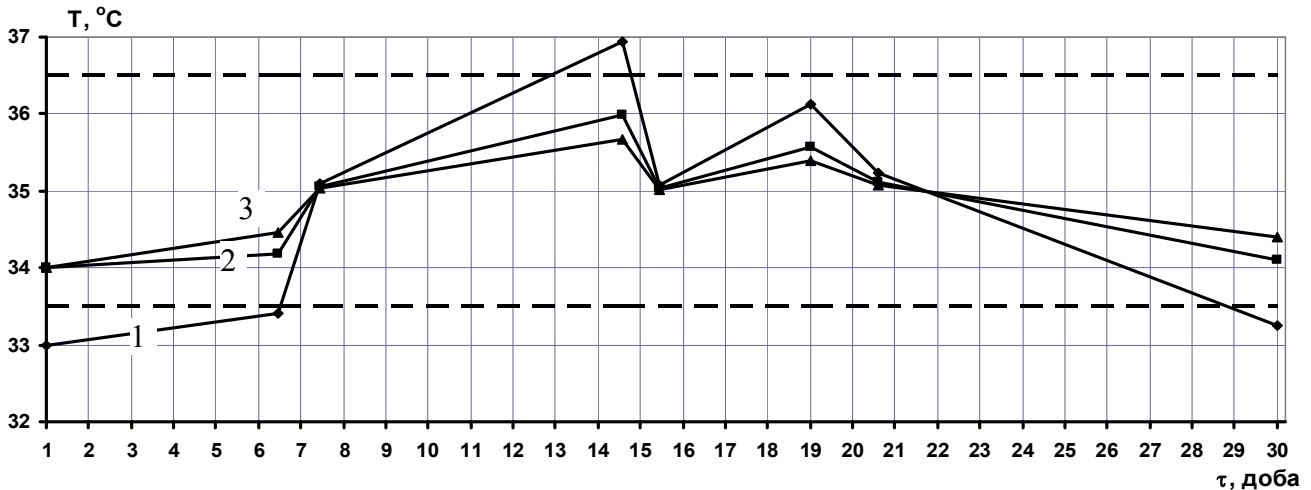
Рис. 3. Зміна температури субстрату в реакторі протягом всього періоду (грудень 2010 р.): 1 –  $R_{i3}=1 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/Вт}$ ;  $\delta_{i3}=0,05 \text{ м}$ ; 2 –  $R_{i3}=2 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/Вт}$ ,  $\delta_{i3}=0,1 \text{ м}$ ; 3 –  $R_{i3}=3 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/Вт}$ ,  $\delta_{i3}=0,15 \text{ м}$ .

За січень виконано аналогічні дослідження. Середня температура зовнішнього повітря за січень дорівнює  $-2,3^\circ\text{C}$ , в залежності від якої, період місяця розділено на 7 ділянок часу  $\Delta t$ . Результат розрахунків представлено на рис.4.

Із рис. 3 та 4 видно, що найбільш ефективною для термостабілізації слід приймати ізоляцію, термічний опір якої знаходиться в межах  $R_{i3} = 2 \dots 3 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/Вт}$ . За опалювальний період, при дотриманні мезофільного режиму в реакторі температура коливається в межах  $T = 35 \pm 1,5^\circ\text{C}$ , діапазон регулювання потрібної теплової потужності системи термостабілізації

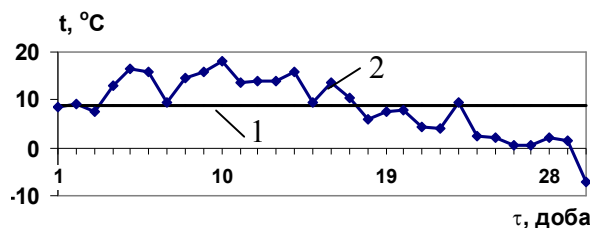
осередненої в часі, становить  $\bar{Q} = 524...334$  Вт. Отже, для подальших досліджень приймаємо товщину ізоляції рівною  $\delta_{із} = 0,15$  м при  $\lambda_{із} = 0,05$  Вт/(м·К).

Протягом міжопалювального періоду (квітень — жовтень 2010 р.) максимальна та мінімальна середня температура повітря за місяць була рівною  $\bar{t}_{max} = 21...25^\circ\text{C}$  і  $\bar{t}_{min} = 11...13^\circ\text{C}$ . За результатами розрахунків визначено, що для забезпечення термічної стабільності реактора теплова потужність змінюється в межах  $\bar{Q} = 326...91$  Вт.



**Рис. 4.** - Зміна температури субстрату в реакторі протягом всього періоду (січень 2011 р.): 1 –  $R_{із} = 1$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт;  $\delta_{із} = 0,05$  м; 2 –  $R_{із} = 2$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт,  $\delta_{із} = 0,1$  м; 3 –  $R_{із} = 3$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт,  $\delta_{із} = 0,15$  м.

Перехідний період року розглянемо на прикладі листопада 2010 р. Впродовж місяця температура зовнішнього повітря різко змінюється (рис. 5). Якщо для визначення  $\bar{Q}$  за розрахункову взяти середню температуру за місяць, яка дорівнює  $\bar{t} = 8,7^\circ\text{C}$ , тоді за проміжок часу, коли температура зовнішнього повітря коливається вище або нижче  $\bar{t}$ , буде спостерігатись, відповідно, недопустимий перегрів або переохолодження субстрату в реакторі. Падіння температури нижче середньої приходить на 15...20-ий день місяця перехідного періоду. Тому для подальших досліджень період листопада було розділено на дві частини і для кожної частини окремо розраховано середню температуру: для першої частини місяця  $\bar{t}_1 = 12,9^\circ\text{C} > 8,7^\circ\text{C}$ , для другої частини  $\bar{t}_2 = 3,1^\circ\text{C} < 8,7^\circ\text{C}$ . Розрахунки показали, що при  $\bar{t}_1$  потужність теплообмінника реактора дорівнює  $\bar{Q}_1 = 295...198$  Вт, а при  $\bar{t}_2$  –  $\bar{Q}_2 = 425...286$  Вт.



**Рис. 5.** - Залежність зміни  $\bar{t}_{доба}$  за листопад, поточного опалювального періоду: 1 – середня температура всього періоду; 2 – середньодобова температура

Аналогічні результати було отримано і для березня 2010 р. Протягом більш теплої частини місяця середня температура повітря  $\bar{t}_1 = 9,3^\circ\text{C}$ ,  $\bar{Q}_1 = 342...231$  Вт; для холодної —  $\bar{t}_2 =$

1,05°C,  $\bar{Q}_2 = 495 \dots 332,5$  Вт.

На основі проведених досліджень визначено, що при організації мезофільного температурного режиму роботи реактора БГУ ( $T = 32 \dots 35^\circ\text{C}$ ) з дотриманням необхідної умови  $-1,5 \leq \Delta T \leq 1,5$ , найбільш ефективною для всіх періодів буде ізоляція з термічним опором  $R_{\text{із}} = 2 \dots 3$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ )/Вт. При такій ізоляції, якщо БГУ буде працювати протягом року в одному температурному режимі необхідна теплова потужність елемента термостабілізації реактора буде змінюватись в межах: теплий період  $Q = 342 \dots 91$  Вт, холодний період  $Q = 524 \dots 286$  Вт.

Вищий рівень термічної стабільності реактора забезпечується при стабілізації не тільки середньої температури субстрату в реакторі, а і температури внутрішньої стінки реактора  $t_{\text{СТ}}^{\text{ВН}}$ . Тобто необхідне одночасне дотримання двох умов:  $-1,5 \leq \Delta T \leq 1,5^\circ\text{C}$ ;  $-1,5 \leq t_{\text{СТ}}^{\text{ВН}} \leq 1,5^\circ\text{C}$ . Проведені числові дослідження показали, що у випадку роботи БГУ в одному температурному режимі при застосуванні рекомендованої ізоляції, температура внутрішньої стінки реактора виходить за межі  $-1,5 \leq t_{\text{СТ}}^{\text{ВН}} \leq 1,5^\circ\text{C}$  протягом перехідного періоду року.

З метою зменшення діапазону регулювання  $\bar{Q}$  та забезпечення повної термічної стабільності, нами запропоновано в теплий період року змінювати тепловий режим роботи БГУ з мезофільного ( $T = 32 \dots 35^\circ\text{C}$ ) на термофільний ( $T = 52 \dots 54^\circ\text{C}$ ). В цьому випадку ізоляцію реактора рекомендується розраховувати за мінімальними температурами в холодний період року, а в міжопалювальний період за допомогою  $\bar{Q}$  підтримувати термофільний режим, більш ефективний з позицій отримання біогазу. Відомо, що процес переходу БГУ на інший температурний режим відбувається на протязі 10-14 днів [1 – 4].

Результати розрахунків запропонованого варіанту роботи БГУ представлено в табл. 1, при  $\square_{\text{із}} \square_1 \dots 0,15$  м,  $\lambda_{\text{із}} = 0,05$  Вт/(м·К).

Таблиця 1

### Зміна діапазону регулювання $\bar{Q}$ при роботі БГУ в двох температурних режимах

Місяць	Період	Тепловий режим роботи БГУ	Необхідна потужність джерела теплової енергії $\bar{Q}$ , Вт	* Середня температура зовнішнього повітря $t$ , °C	відхилення температури внутрішньої стінки реактора $\Delta t_{\text{СТ}}^{\text{ВН}}$ , °C
Січень	опалювальний	мезофільний	352...524	-2,3	-1,5...-0,19
Лютий			352...524	-5,2	-1,0...-0,6
1-ша частина березня	перехідний	термотолерантний	352...524	-1,1	-1,5...+0,5
2-га частина березня			352...524	9,3	-0,9...-0,4
Квітень	міжопалювальний	термофільний	352...524	12,0	-0,9...+0,2
Травень			352...524	18,0	-1,3...+1,5
Червень			420...260	22,0	-1,4...+1,4
Липень			420...260	24,8	-0,6...+0,6
Серпень			420...260	24,9	-0,4...+1,0
Вересень			352...524	16,0	-0,03...+1,1
Жовтень			352...524	11,5	-1,3...+0,05
1-ша частина листопада			перехідний	термотолерантний	352...524
2-га частина листопада	352...524	3,1			-0,4...+0,6
грудень	опалювальний	мезофільний	352...524	-4,3	-1,5...-0,2

\* На прикладі 2010 року

Отже, організація роботи реактора БГУ в двох температурних режимах призводить до зменшення діапазону регулювання необхідної потужності, що дозволяє більш коректно підібрати та стабілізувати роботу джерела теплової енергії.

Таким чином, використовуючи запропоновану методику, яка враховує нерівномірності коливань температур навколишнього середовища, можна оптимізувати вибір параметрів теплоізоляції; визначити потужність, яка подається в реактор; обґрунтувати вибір температурного режиму бродіння реактора БГУ. Дослідження діапазонів регулювання теплового навантаження потрібні для вибору джерела енергії, визначення параметрів теплоносія, можливостей і методів регулювання температури теплоносія в теплообміннику. Тобто, результати чисельних досліджень, проведених за даною методикою, можуть бути теоретичною основою не тільки для проектування БГУ, але й для розробки принципів автоматизації забезпечення стабільності роботи реакторів БГУ.

### **Висновки**

1. Запропоновано методику оптимізації параметрів системи термостабілізації реактора фермерських БГУ невеликої потужності та наведено приклад її застосування для реактора БГУ об'ємом 10 м<sup>3</sup>, в результаті якого визначено, що для забезпечення умови дотримання відхилення температури в реакторі БГУ від номінальної не вище  $\Delta T = \pm 1,5^\circ\text{C}$  протягом року, найбільш оптимальною є ізоляція, термічний опір якої дорівнює  $R_{\text{із}} = 2 \dots 3 \text{ (м}^2 \cdot \text{К) / Вт}$ . При цьому, з метою стабілізації роботи обладнання для отримання теплової енергії, доцільно здійснювати роботу реактора анаеробної переробки відходів в двох температурних режимах: в холодний період року – в мезофільному ( $T = 32 \dots 35^\circ\text{C}$ ), в теплий період – термофільному ( $T = 52 \dots 54^\circ\text{C}$ ).

2. Використовуючи запропоновану методику, з'являється можливість вибору ефективної теплоізоляції з врахуванням коливання зовнішньої температури протягом року, оптимізації роботи теплообмінного обладнання БГУ, забезпечення термічної, і, як наслідок, біотехнологічної стабільності в реакторі анаеробної переробки відходів.

3. За допомогою даної методики, отримано технологічні основи автоматизації підтримання стабільності термічних та біотехнологічних процесів в реакторі анаеробної переробки органічних відходів.

### **Література**

1. Баадер Б. Биогаз: Теория и практика / Б. Баадер, Е. Доне, М. Брендерфер. – М.: Колос, 1982. – 148 с.
2. Семенов И. В. Проектирование биогазовых установок / И. В. Семенов. – К.: Техніка, 1992. – 346 с.
3. Гелетуха Г. Г. Современные технологии анаэробного сбраживания биомассы / Г. Г. Гелетуха, С. Г. Кобзар // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. – № 4. – С. 3 – 11.
4. Волова Т. Г. Биотехнология / Т. Г. Волова. – Новосибирск : Изд-во Сибирского отделения Российской Академии наук, 1999. – 252 с.
5. Архів фактичної погоди. – Режим доступу: <http://www.gismeteo.ua>; <http://diary.gismeteo.ru/4962/2009/11>