

I. В. ГУРАЛЬ

## МАКРОМОДЕЛЮВАННЯ СТАДІЇ МЕТАНОГЕНЕЗУ ЗБРОДЖУВАННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ У БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ

Розглянуто задачу моделювання процесів анаеробного мікробіологічного бродіння на стадії метаногенезу з дотриманням балансу. Запропоновано та обґрунтовано модель на цій стадії будувати у вигляді інтервальної дискретної динамічної моделі. Обґрунтовано метод структурної ідентифікації інтервальної дискретної динамічної моделі на принципах функціонування бджолиної колонії у процесі пошуку їжі, який забезпечує можливість отримання простіших структур моделі із заданими прогностичними властивостями по відношенню до існуючих методів.

**Ключові слова:** структурна ідентифікація, біогазові установки, метаногенез, інтервальна дискретна динамічна модель, алгоритм бджолиної колонії.

Рассмотрена задача моделирования процессов анаэробного микробиологического брожения на стадии метаногенезу с соблюдением баланса. Предложено и обосновано модель на этой стадии изобразить в виде интервальной дискретной динамической модели. Обоснован метод структурной идентификации интервальной дискретной динамической модели на принципах функционирования пчелиной колонии в процессе поиска пищи, который обеспечивает возможность получения простых структур модели с заданными прогностическими свойствами по отношению к существующим методам.

**Ключевые слова:** структурная идентификация, биогазовые установки, метаногенез, интервальная дискретная динамическая модель, алгоритм пчелиной колонии.

The problem of modeling the processes of anaerobic microbiological fermentation on the methanogenesis stage with keeping the balance is considered in this work. It is proposed and justified to build the model on this stage in the form of an interval discrete dynamic model. The method of structural identification of the interval discrete dynamic model based on the principles of functioning of a honey bee colony in the food search process, which provides the possibility of obtaining simple model structures with specified prognostic properties relative to existing methods, is justified. A macro-model of the fermentation process on the methanogenesis stages based on the interval discrete dynamic model, which provides guaranteed prognostic properties for different anaerobic microbial fermentation under changing acidity, is developed in this paper. It is shown that the resulting model describes adequately and qualitatively the percentage of SSU rRNA methane forming bacteria at biogas plants.

**Key words:** structure identification, biogas plants, methanogenesis, interval discrete dynamic model, artificial bee colony algorithm.

**Вступ.** Із зростанням кількості населення міст та промислових підприємств постійно збільшується кількість відходів. Побутові відходи утворюються і накопичуються не лише у житлових приміщеннях, а й у офісах, адміністративних спорудах, кінотеатрах і театрах, магазинах, кафе й ресторанах, дитячих садках, школах, інститутах, лікарнях, готелях, на вокзалах, ринках чи й просто на вулицях. Промислові і побутові відходи створюють багато екологічних проблем [1].

Якщо не проводити утилізацію відходів, а зберігати всі відходи на сміттєзвалищах, утворюються супутні екологічні проблеми, а саме: вимивання поживних речовин і забруднення внутрішніх вод; утворення метану, що призводить до парникового ефекту; просідання ґрунту і т. д. [2]. Таким чином, нагромадження твердих побутових органічних відходів (ТПОВ) є однією із сучасних екологічних проблем. Для її вирішення потрібно утилізувати ТПОВ за допомогою біогазових установок (БГУ), які дають змогу разом із розв'язанням екологічної проблеми отримувати високоефективні органічні добрива та енергію у вигляді біогазу [3].

В основних елементах БГУ проходять складні тепломасообмінні процеси на різних стадіях метанового бродіння. Такі процеси визначені і описані в працях [4, 5], проте в БГУ часто виникають проблеми недотримання технологічних вимог, при яких недотримується і баланс.

Найбільш вагомими результатами при дослідженні проблематики переробки твердих органічних побутових відходів шляхом анаеробного мікробіологічного бродіння отримали наукові школи таких українських та зарубіжних вчених, як *Matt E. Griffin, Katherine D. McMahon, Roderick I. Mackie, Lutgarde Raskin, Н.Б. Голуб, О.А. Козловець*.

На сьогоднішній день процеси анаеробного мікробіологічного бродіння описано також у ряді праць на рівні макромоделей типу «вхід-вихід» [6, 7]. Проте такі моделі не придатні для розв'язування задач управління, оскільки вони не відображають балансу продуктів на різних етапах, що не забезпечує ефективності організації процесу в БГУ. Як наслідок вкрай рідко випадку, низький вихід біогазу, а в гіршому – затухання реакції через загибель мезофільних бактерій. Тому метою даної праці є розробка макромоделей процесу анаеробного мікробіологічного бродіння для окремих етапів. Зокрема, розглянуто задачу макромоделювання для кінцевого етапу – *метаногенезу*.

**Аналіз процесів у біогазових установках.** Розглянемо процес утворення біогазу шляхом анаеробного мікробіологічного збродження твердих побутових органічних відходів.

Процес утворення біогазу називають *метановим бродінням*. Його суть полягає в анаеробному бродінні, яке відбувається внаслідок життєдіяльності мікроорганізмів і супроводжується рядом біохімічних реакцій [5]. Кілька видів мікроорганізмів беруть участь у загальних реакціях, які включають в себе такі стадії: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез і метаногенез [8]. Анаеробне бродіння вимагає збалансовану діяльність мікробних об'єднань для окислення субстратів та видалення інгібуючих кислот і водню для утворення метану.

Відповідно до цих етапів біометаногенезу у процесі беруть участь такі групи бактерій:

- целюлозолітичні, деструктивні гідролітики метаногенної асоціації – гідролізують складні органічні субстрати до органічних кислот (масляна, пропіонова і молочна), а також нижчих спиртів, аміаку, водню;
- ацетотрофні ацетогени метаногенної асоціації – перетворюють органічні кислоти та оцтову кислоту, водень і оксиди вуглецю;
- ацетотрофні метаногени використовують кислоти і ацетат (CH<sub>3</sub>COO-) як джерело вуглецю і джерело енергії, які метаболізується у вуглекислий газ і метан; гідрогенотрофні метаногени – строгі анаероби, серед них зустрічаються як мезофільні, так і термофільні форми, гетеротрофи і автотрофи використовують вуглекислий газ як джерело вуглецю і водень як джерело енергії, а частина вуглекислоти реагує з воднем, утворюючи метан [9].

На етапі розчинення і гідролізу органічних сполук задіюються мікроорганізми, що володіють целюлозолітичною, протеолітичною, ліполітичною, сульфовідновлюючою, денітрифікуючою та іншими видами активності. Склад домінуючої мікрофлори цієї фази залежить від складу мікрофлори вхідної сировини, а також від хімічної природи проміжних продуктів розпаду органічних речовин.

У цій фазі біля 76 % органічних речовин перетворюється у вищі жирні кислоти, до 20 % – в ацетат і 4 % – у водень. Цю фазу можна умовно розділити на дві частини: гідролізу і ацидогенезу (кислотоутворення).

На етапі ацетогенезу в процес задіюються ацетогенні і гідрогенпродукуючі бактерії. Вони перетворюють пропіонат в ацетат, CO<sub>2</sub> та H<sub>2</sub>, якщо в середовищі одночасно присутні водень-споживаючі бактерії, оскільки водень є інгібітором оцтовокислих бактерій. В 1967 р. встановлено, що оцтовокислі та метаноутворюючі мікроорганізми – симбіонти, їх раніше вважали одним мікробом, який називали *Methanobacillus omelianskii* і який входить до типу *Bacteria* [10].

Третій етап – метаногенний. В ньому задіяні метаноутворюючі бактерії. З біохімічної точки зору метанове бродіння – це анаеробне дихання, в результаті якого електрони від органічних речовин переносяться до вуглекислого газу, котрий потім відновлюється до метану. Окрім різних органічних субстратів (таких, як оцтова кислота), донором електронів для метанобактерій слугує водень, котрий продукується декількома типами анаеробних бактерій.

В умовах строгого анаеробіозу метан можна отримати з ароматичних сполук. У цьому процесі беруть участь декілька видів мікроорганізмів, відповідальних за різні стадії деградації ароматичних кілець до ацетату, який є одним із субстратів для метанобактерій. Його дегідровання дає електрони, які потрібні для відновлення двоокису вуглецю до метану.

У процесах деструкції органічної біомаси до кислот беруть участь асоціації облигатних і факультативних анаеробних організмів, серед яких гідролітичні, кислотогенні, ацетогенні представники родів: *Enterobacteriaceae*, *Lactobacillaceae*, *Sterptococcaceae*, *Clostridium*, *Butyrivibrio* [9].

Активними метанотвірними компонентами метаногенної асоціації, здатними безпосередньо до біосинтезу метану, є невелика група *метаногенеруючих архебактерій*, життєдіяльність яких відбувається в строго анаеробних умовах, які використовують енергію реакції біосинтезу метану, метаболізують водень, кислоти, спирти і оксид вуглецю в метан, відновлюючи вуглекислий газ в метан з поглинанням водню, який також може інгібувати оцтовокислі бактерії, проте відомо, що оцтовокислі і метанотвірні мікроорганізми утворюють *симбіотичну асоціацію*.

Відомі понад 50 видів метаногенів, які поділяються на три класи — *Methanobacteria*, *Methanococci* і *Methanopyri*, що входять до типу *Euryarchaeota*, а саме до цієї групи метаногенів належать *Methanosarcina barkeri*, *Methanococcus mazei*, *Methanothrix soengenii*, *Methanobacterium formicicum*, *Methanospirillum hungati*, *M. vannielii*, *Mb. thermoautotrophicum*, *Methanobacterium kadomensis*, *Methanobacillus kuzneceovii*, *Methanobrevibacter ruminantium* [9].

*Архебактерії* відрізняються від *прокаріотичних мікроорганізмів* відсутністю муреїну в клітинній стінці; специфічним, таким, що не містить жирних кислот, складом ліпідів; наявністю специфічних компонентів метаболізму у вигляді коферменту М (2-меркаптоетансульфонової кислоти) і фактора F420 (особливий флавін); специфічною нуклеотидною послідовністю 16s рРНК. Рибосомна РНК (рРНК) — вид РНК, що є центральним компонентом рибосоми, комплексу, що збирає білки у клітині, рРНК разом з 70 – 80 рибосомними білками потім збираються в дві складні субодиниці (велика і маленька субодиниці). Гени рибосомних РНК еукаріотів розміщені у кластерах тандемних повторів, довжиною 11 тис. пар основ. Кожен кластер містить гени 18S, 5,8S та 28S рРНК. Такі кластери повторюються від 100 до 1000 разів і разом формують ядерцевий організатор [11]. У бактерій, архей, мітохондрій і хлоропластів маленька рибосомна субодиниця (МСО) містить 16S рРНК, де S в 16S означає *одиниці Сведберга* [12]; велика рибосомна субодиниця містить два види рРНК (5S і 23S рРНК). Архебактерії можуть містити як містять або єдиний оперон рРНК, так і багато його копій [11]. У середині цієї групи окремі представники метанотвірних бактерій можуть істотно відрізнятися один від одного за низкою показників, зокрема вмістом ГЦ (вміст гуаніну і цитозину) у ДНК.

Для всіх метанобактерій характерна здатність рости у присутності водню і вуглекислого газу, а також висока чутливість до кисню і інгібіторів виробництва метану. У природних умовах присутня *трофічна асоціація* метанобактерій, тісно пов'язаних з гідрогенними бактеріями, що продукують газоподібний водень, який споживається метаногенами; у результаті його концентрація знижується і стає безпечною для воденьотвірних

бактерій.

Ці реакції протікають одночасно, причому умови існування метаноутворюючих бактерій значно вищі, ніж кислотоутворюючі. Швидкість і масштаби анаеробного бродіння метаноутворюючих бактерій залежать від їх метаболічної активності. Разом з тим існуючі хімічні перетворення не дають можливості змоделювати весь процес бродіння і визначити в динаміці оптимальні умови його забезпечення. А існуючі макромоделі, які використовуються для моделювання біогазу, що описують залежність субстрату в вигляді ТПОВ, не дають можливість керувати цим процесом.

**Постановка задачі.** У праці [5] розглянута макромодель виробництва біогазу, яка ґрунтується на вимірюваннях об'єму залишкової маси. Цю модель записують у вигляді інтервальної дискретної динамічної моделі (ІДДМ)[5]:

$$[\bar{v}_k^-; \bar{v}_k^+] = [\bar{v}_{k-1}^-; \bar{v}_{k-1}^+] - \frac{h \cdot [\bar{g}_1^-; \bar{g}_1^+] \cdot [\bar{v}_{k-1}^-; \bar{v}_{k-1}^+] \cdot (1 + h \cdot ([\bar{g}_2^-; \bar{g}_2^+] \cdot [\bar{v}_{k-2}^-; \bar{v}_{k-2}^+] - [\bar{g}_3^-; \bar{g}_3^+]))}{([\bar{g}_4^-; \bar{g}_4^+] + [\bar{v}_{k-1}^-; \bar{v}_{k-1}^+])}, \quad k = 1, \dots, K, \quad (1)$$

де  $[\bar{v}_k^-; \bar{v}_k^+]$  – оцінка гарантованого інтервалу об'єму залишкової маси органічних відходів у  $k$ -тий момент часу;  $[\bar{g}_i^-; \bar{g}_i^+]$  – інтервальні оцінки параметрів, при  $i = 1, \dots, 4$ .

Недоліком такої моделі є те, що вона не описує баланс біохімічних процесів на всіх стадіях. В результаті – використання зазначеної моделі не дає можливість організувати процес анаеробного мікробіологічного бродіння в БГУ в такий спосіб, щоб забезпечити максимальний вихід біогазу. Виходом з цієї ситуації може слугувати підхід, при якому для кожного етапу анаеробного мікробіологічного бродіння ТПОВ будують окремі макромоделі і на їх основі забезпечують баланс продуктів кожного з етапів в такий спосіб, щоб загалом забезпечити максимальний вихід біогазу.

Зважаючи на вище зазначене у даній праці розглянуто макромодель кінцевого етапу анаеробного мікробіологічного бродіння – метаногенезу. Приклади моделі динаміки концентрації ацетату на стадії ацидогенезу та моделі динаміки відсотку МСО рННК метаноутворюючих бактерій на етапі ацетогенезу опубліковано в праці [13].

Розглянемо математичне формування зазначеної задачі.

Нехай для деякого процесу ферментації на стадії метаногенезу при заданому рівні кислотності середовища рН відомі часові значення утворення метаноутворюючих бактерій у біогазовій установці:

$$[\bar{V}^-; \bar{V}^+] = ([v_1^-; v_1^+], \dots, [v_k^-; v_k^+], \dots, [v_N^-; v_N^+])^T, \quad (2)$$

де  $[v_k^-; v_k^+]$  – нижнє та верхнє значення виміряного відсотку МСО рННК метаноутворюючих бактерій на  $k$ -тій дискреті часу.

Необхідно побудувати математичну модель у вигляді дискретної динамічної моделі:

$$v_k = \bar{f}^T(v_0, \dots, v_{k-1}) \cdot \bar{g}, \quad k = p, \dots, K, \quad (3)$$

де  $\bar{f}^T(\bullet)$  – вектор невідомих базисних функцій (відомого класу), що визначає структуру дискретної динамічної моделі; символ  $(\bullet)$  означає набір базисних функцій в рівнянні (3);  $v_k$  – відсоток МСО рННК метаноутворюючих бактерій в часовій дискреті  $k = p, \dots, K$ ;  $\bar{g} = (g_1, \dots, g_i)^T$  – вектор невідомих параметрів дискретної динамічної моделі.

Слід зазначити, що загальний вигляд дискретної динамічної моделі (3) отримуватимемо на основі аналізу експериментальних даних, які представлено в інтервальному вигляді та отримано для обмеженої кількості часових дискрет за умов заданої кислотності середовища рН. При цьому вектор оцінок  $\hat{g}$  параметрів  $\bar{g}$  та вектор базисних функцій  $\bar{f}^T(\bullet)$  у дискретній динамічній моделі (3) отримуватимемо із умов забезпечення заданої точності моделі:

$$[\bar{v}_k^-; \bar{v}_k^+] \subseteq [v_k^-; v_k^+], \quad \forall k = 1 \dots N, \quad (4)$$

де  $[\bar{v}_k^-; \bar{v}_k^+]$  – у формулі (1) тепер і надалі вважатимемо інтервальними оцінками прогнозованого відсотку МСО рННК метаноутворюючих бактерій в субстраті.

У результаті, математичну задачу ідентифікації параметрів моделі запишемо у вигляді інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь (ІНАР) [14]:

$$\begin{cases} [\bar{v}_0^-; \bar{v}_0^+] \subseteq [v_0^-; v_0^+], [\bar{v}_1^-; \bar{v}_1^+] \subseteq [v_1^-; v_1^+], \dots, [\bar{v}_p^-; \bar{v}_p^+] \subseteq [v_p^-; v_p^+]; \\ [\bar{v}_k^-; \bar{v}_k^+] = [\bar{v}_k^-; \bar{v}_k^+] = \bar{f}^T([\bar{v}_0^-; \bar{v}_0^+], \dots, [\bar{v}_{k-1}^-; \bar{v}_{k-1}^+]) \cdot \hat{g}; \\ \bar{v}_k^- \leq \bar{f}^T([\bar{v}_0^-; \bar{v}_0^+], \dots, [\bar{v}_{k-1}^-; \bar{v}_{k-1}^+]) \cdot \hat{g} \leq v_k^+, \quad k = p, \dots, K, \end{cases} \quad (5)$$

де  $[\bar{v}_0^-; \bar{v}_0^+]$ ,  $[\bar{v}_p^-; \bar{v}_p^+]$  – інтервальні оцінки відсотку МСО рННК метаноутворюючих бактерій в часовій дискреті  $k = 0$  та  $k = p$  відповідно.

Таким чином задача ідентифікації параметрів ІДДМ сумарного відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій є задачею розв'язування ІСНАР (5). Проте в загальному випадку базисні функції  $\vec{f}^T(\bullet)$  є невідомими, що призводить до задачі структурної ідентифікації ІДДМ. Суть цієї задачі полягає у формуванні послідовності структур ІДДМ, які забезпечують побудову ІСНАР у вигляді (5). Одна із ІСНАР (5) в послідовності виявиться сумісною, що означатиме завершення процедури побудови ІДДМ у вигляді:

$$[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+]) \cdot \hat{g}. \quad (6)$$

**Модель динаміки відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій в БГУ.** Розглянемо процес виробництва біогазу на кінцевому етапі (метаногенезі) анаеробного мікробіологічного бродіння. Основним вихідним продуктом цього етапу є біогаз.

Скористаємося результатами досліджень, наведених у працях [10, 13], де розглянуто процеси анаеробного бродіння твердих побутових органічних відходів (ТПОВ). У біореактор, в якості речовин для отримання біогазу, завантажували органічні продукти, експериментальні дані яких отримано із праці [10]. В реактор також було додано  $\text{NaHCO}_3$  (3 г) і  $\text{NaOH}$  (2 мл), для контролю і підвищення рН середовища до 7,2, так як при завантаженні субстрату рівень рН був не достатній для процесу анаеробного бродіння [10]. Посівний матеріал для варильного котла складається з 500 мл суміші анаеробного мулу (75 %) і гній великої рогатої худоби (25 %). Також добавили 150 мл дистильованої води. В кінцевому результаті, робочий об'єм субстрату склав 3 л [10].

Процес бродіння досліджувався від початку завантаження твердих органічних побутових відходів протягом 50 діб при температурі  $T_0 = [35; 37]^\circ\text{C}$  [10].

Вибір МСО рРНК цільових олігонуклеотидних зондів був використаний для визначення відносних концентрацій трьох доменів (*Bacteria*, *Archaea* і *Eucarya*). Сума відносних кількостей *Bacteria*, *Archaea* і *Eucarya* (представлені у вигляді відсотка від загального МСО рРНК) повинна дорівнювати 100 %, так як всі відомі організми містяться в межах цих трьох областей [9]. *Bacteria* становили більшість мікроорганізмів в реакторах, *Archaea* присутні в менших кількостях (менше 10 % в більшості випадків), і *Eucarya* присутні на дуже низькому рівні (кошти для обох виручених були нижче на 0,8 %).

На етапі метаногенезу в процес метаноутворюючі бактерії, які входить до типів *Archaea* і *Eucarya*.

Відсоток МСО рРНК метаноутворюючих бактерій  $[v_k^-; v_k^+]$  вираховувався щодня. Результати експериментальних даних вимірювання, отриманих із праці [10], відзначаються точністю в межах 5 %. Тому в процесі ідентифікації моделі необхідним є виконання умови, щоб інтервальні оцінки прогнозованого значення концентрації ацетату були в межах цієї похибки.

Результати вимірювань відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Експериментальні дані відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій протягом 50 діб в інтервальному вигляді

$k$	$\tau$ , діб	$v_k^-$ , % МСО рРНК	$v_k^+$ , % МСО рРНК	$k$	$\tau$ , діб	$v_k^-$ , % МСО рРНК	$v_k^+$ , % МСО рРНК
0	1	9,5	10,5	26	27	7,068	8,284
2	3	8,55	9,45	28	29	5,9125	6,78
4	5	7,44	8,56	30	31	3,9525	4,7475
6	7	7,89	9,23	32	33	2,325	3,375
8	9	8,835	10,165	34	35	1,767	2,333
10	11	7,89	9,23	36	37	1,7475	1,9825
12	13	6,324	7,346	38	39	1,6575	1,9025
14	15	4,8825	5,6175	40	41	1,6275	1,8725
16	17	5,115	5,885	42	43	1,6275	1,8725
18	19	5,8125	6,68	44	45	1,6275	1,8725
20	21	6,975	8,025	46	47	1,6275	1,8725
22	23	7,975	9,025	48	49	1,6275	1,8725
24	25	7,875	8,925	49	50	1,6275	1,8725

Слід зауважити, що експериментальні дані встановлено при заданих факторах впливу: температура середовища  $[T^-; T^+] = [35; 37]^\circ\text{C}$  і кислотність середовища  $\text{pH} = 7,2$ .

Для синтезу математичної моделі процесу потрібно перш за все сформулювати структуру моделі (*етап структурної ідентифікації*), після цього провести процедуру налаштування її параметрів (*етап параметричної ідентифікації*) [15].

Для розв'язання цієї задачі структурної ідентифікації ІДДМ, у праці [16] запропоновано *алгоритм поведінки бджолиної колонії*. Детальний опис зазначеного алгоритму на стадії ацетогенезу наведено у праці [13]. Тому зупинимось на основних моментах даного алгоритму, а саме для моделювання на стадії метаногенезу.

Позначимо за  $\lambda_s$  поточну структуру інтервальної дискретної динамічної моделі:

$$\lambda_s = \{f_1^s(\bullet) \cdot g_1^s; f_2^s(\bullet) \cdot g_2^s; \dots; f_{m_s}^s(\bullet) \cdot g_{m_s}^s\} \subset \Lambda, \quad (7)$$

де  $\vec{f}^s = \{f_1^s(\bullet); f_2^s(\bullet); \dots; f_{m_s}^s(\bullet)\} \subset F$  – набір структурних елементів, що задає поточну  $s$ -ту структуру ІДДМ.

Далі введемо наступні умовні позначення:  $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$  – кількість елементів у поточній структурі  $\lambda_s$ ;  $F$  – множина усіх структурних елементів,  $F = \{f_1(\vec{v}_{k-1}); \dots; f_l(\vec{v}_{k-1}); \dots; f_L(\vec{v}_{k-1})\}$ , де  $|F| = L$  (потужність множини  $F$ );  $\vec{g}^s = \{g_1^s; g_2^s; \dots; g_{m_s}^s\}$  – вектор невідомих значень параметрів, який для поточної структури ІДДМ оцінюватиметься на основі методів параметричної ідентифікації, які ґрунтуються на процедурах випадкового пошуку [17];  $\Lambda$  – множина усіх можливих структур ІДДМ.

Задача структурної ідентифікації полягає у пошуку структури  $\lambda_0$  ІДДМ у вигляді (7), щоб сформований на основі неї інтервальний різницевий оператор:

$$[v_k^-; v_k^+] = [f_1^0(\bullet)] \cdot \hat{g}_1^0 + [f_2^0(\bullet)] \cdot \hat{g}_2^0 + \dots + [f_{m_0}^0(\bullet)] \cdot \hat{g}_{m_0}^0 \quad (8)$$

задовольняв умови (4), тобто забезпечував належність інтервальних оцінок прогнозованого значення модельованої характеристики до інтервалів допустимих значень модельованої характеристики на множині усіх дискрет.

Варто зазначити, що параметрична ідентифікація в даному випадку є етапом структурної ідентифікації. Як відомо, у випадку, коли дані задано в інтервальному вигляді, цей етап полягає у формуванні деякого вектора базисних функцій (поточної структури  $\lambda_s$  ІДДМ) і знаходженні оцінок параметрів ІДДМ шляхом розв'язування інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь (ІСНАР) [14]. Проте, взамін розв'язування ІСНАР (надзвичайно складної обчислювальної задачі) шукають її деяке наближення до розв'язку, яке задає якість поточної структури ІДДМ  $\lambda_s$ . В цьому випадку задача розв'язування ІСНАР набуває вигляду оптимізаційної задачі.

Отже, якість поточної структури ІДДМ оцінюватимемо за значенням функції мети  $\delta(\lambda_s)$ , який кількісно визначає наближеність поточної структури до задовільної в сенсі забезпечення умов (4). Значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$  обчислюватимемо за допомогою виразів, отриманих у праці [19], вигляд яких для фіксованої структури такий:

$$\delta(\lambda_s) = \max_{k=1, \dots, K} \left\{ \left| \text{mid}(\vec{f}^{Ts}([\hat{v}_0], \dots, [\hat{v}_{k-1}]) \cdot \hat{g}^s), -\text{mid}([v_k]) \right| \right\},$$

якщо  $[\hat{v}_k] \cap [v_k] = \emptyset, \exists k = 1, \dots, K;$  (9)

$$\delta(\lambda_s) = \max_{k=1, \dots, K} \left\{ \left| \text{mid}(\vec{f}^{Ts}([\hat{v}_0], \dots, [\hat{v}_{k-1}]) \cdot \hat{g}^s) - \text{wid}((\vec{f}^{Ts}([\hat{v}_0], \dots, [\hat{v}_{k-1}]) \cdot \hat{g}^s) \cap [v_k]) \right| \right\},$$

якщо  $[\hat{v}_k] \cap [v_k] = \emptyset, \forall k = 1, \dots, K;$  (10)

де  $\text{mid}(\bullet)$ ,  $\text{wid}(\bullet)$  – операції визначення центру та ширини інтервалів, відповідно.

Вираз (9) описує наближеність поточної структури до задовільної на початкових ітераціях, тим часом як вираз (10) у випадку  $\delta(\lambda_s) = 0$  забезпечує виконання умови (8).

Тепер задачу структурної ідентифікації ІДДМ запишемо формально у вигляді задачі знаходження мінімуму функції мети  $\delta(\lambda_s)$ :

$$\delta(\lambda_s) \xrightarrow{\vec{g}^s \vec{f}^s(\bullet)} \min, \quad m_s \in [I_{\min}; I_{\max}], \quad \vec{f}^s(\bullet) \in F. \quad (11)$$

Для обчисленого значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$  для фіксованої структури  $\lambda_s$  ІДДМ за будь-яких умов справедливою буде нерівність  $\delta(\lambda_s) \geq 0$ . Таким чином, можна стверджувати, що функція мети  $\delta(\lambda_s)$  має глобальний екстремум лише у тих точках, для яких виконується наступна рівність:  $\delta(\lambda_s) = 0$ . Опираючись на теорію множинності моделей [18], можна стверджувати, що у просторі пошуку розв'язків задачі структурної ідентифікації ІДДМ функція  $\delta(\lambda_s)$  має багато глобальних мінімумів.

Чим менше значення  $\delta(\lambda_s)$ , тим краща поточна структура ІДДМ. Якщо  $\delta(\lambda_s) = 0$ , то поточна структура ІДДМ дає можливість побудувати адекватну модель, для якої інтервальні оцінки прогнозованої характеристики належать до інтервалів можливих значень модельованої характеристики.

Тепер перейдемо до практичної реалізації задачі структурної ідентифікації макромоделі відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій в БГУ.

Спочатку, спираючись на відомі особливості процесу метаногенезу, згенеруємо набір структурних елементів у вигляді ІДДМ. Результати цієї процедури наведено в табл. 2.

Для синтезу структури ІДДМ(6) за допомогою методу структурної ідентифікації згенеровано множину структурних елементів  $F$  з потужністю  $L = 520$ . Множина структурних елементів містить поліноміальні функції не вище третього степеня. Тобто шукатимемо інтервальний різницевий оператор не вище третього порядку.

Для реалізації методу структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора на основі алгоритму бджолоїної колонії задаємо параметрів алгоритму:  $MCN$  (максимальне кількість ітерацій алгоритму),  $LIMIT$  (максимальну можливу кількість ітерацій незмінності структури, тобто якщо структура ІДДМ не давала покращен-

ня уже *LIMIT* разів, то вона вважається вичерпаною),  $S$  (початкову кількість структур ІДДМ),  $[I_{\min}; I_{\max}]$  (інтервал, межі якого задають відповідно мінімальне  $I_{\min}$  та максимальне  $I_{\max}$  значення потенційної кількості структурних елементів у структурі ІДДМ  $\lambda_s$ ) та множину структурних елементів  $F$  [17]. Далі відбувається формування початкової множини структур ІДДМ  $\Lambda_0$  (потужності  $S$ ).

Таблиця 2 – Множина структурних елементів  $F$  моделей утворення метаноутворюючих бактерій на етапах анаеробного процесу бродиння

№	Структурні елементи
1.	$v_{k-1}$
2.	$v_{k-2}$
3.	$v_{k-1} \cdot v_{k-2}$
4.	$v_{k-1}^2$
5.	$v_{k-1}^3$
6.	$v_{k-1}^2 \cdot v_{k-2}$
7.	$v_{k-2}^2 \cdot v_{k-1}$
8.	$v_{k-1}^3$
9.	$v_{k-2}^3$

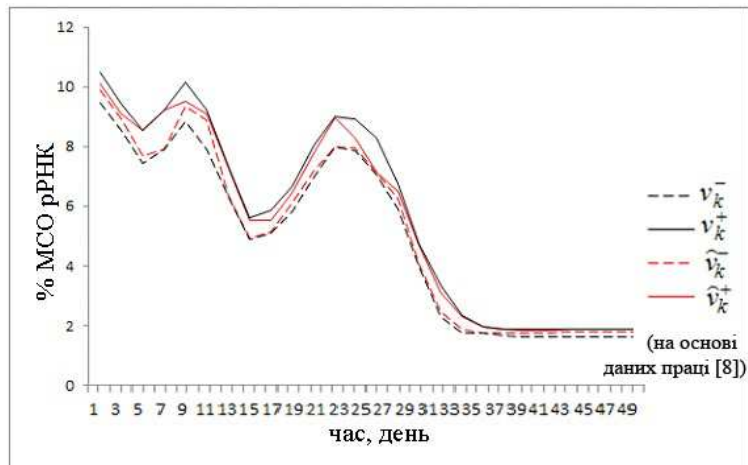


Рис. 1 – Коридор динаміки відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій в БГУ.

Спираючись на процедури алгоритму бджолоїної колонії послідовно формуватимемо з набору структурних елементів нові елементи, кожен раз будуючи функцію мети і розв'язуючи задачу мінімізації для заданого набору [18].

Враховуючи заданий початковий набір структурних елементів (табл. 2) на кожній ітерації з використанням операторів алгоритму бджолоїної колонії (оператор  $P_D(\Lambda_{mcn}, F)$  означає перетворення кожної структури  $\lambda_s^1$  з множини структур  $\Lambda_{mcn}^1$ , першого ряду формування згенерованих на ітерації алгоритму  $mcn$ , у множини структур ІДДМ  $\Lambda_s'$  (де  $s=1 \dots S$ ) у спосіб заміни випадковим чином  $n_s$  елементів кожної структури  $\lambda_s^1$ , елементами із множини структурних елементів  $F$ ; оператор  $D_2(\lambda_s, \Lambda_s')$  реалізує процес синтезу множини структур ІДДМ  $\Lambda_{mcn}^2$  із поточних множин  $\Lambda_{mcn}^1$  та  $\Lambda_{mcn}'$ , у спосіб селекції структур ІДДМ  $\lambda_s^2$  за показниками якості; оператор  $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$  означає генерування випадковим чином структури  $\lambda_s^2$  із множини усіх структурних елементів  $F$ , де кількість структурних елементів –  $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$ ), отримуємо послідовність структур, які в кінцевому випадку забезпечують виконання умови (4) для всіх дискретних значень.

**Результати дослідження.** В результаті застосування алгоритму бджолоїної колонії до розв'язування задачі (11) після 15 ітерацій модифікацій ІСНАР (5) отримали ІДДМ, які визначають відсоток МСО рРНК метаноутворюючих бактерій в БГУ:

$$[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = [0,0067; 0,00672] - [\hat{v}_{k-2}^-; \hat{v}_{k-2}^+] \cdot [0,003756; 0,00376] + [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+] \cdot [\hat{v}_{k-2}^-; \hat{v}_{k-2}^+] \cdot [0,001388; 0,00139] - [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+] \cdot [0,004363; 0,004369] - [\hat{v}_{k-2}^-; \hat{v}_{k-2}^+] \cdot [\hat{v}_{k-2}^-; \hat{v}_{k-2}^+] \cdot [0,000111; 0,000112] + [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+] \times [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+] \cdot [0,00013; 0,000132] \subset [v_k^-; v_k^+]. \tag{12}$$

Отримана інтервальна дискретна динамічна модель і параметри адекватно відображають процес метаногенезу.

Результати прогнозування в порівнянні з експериментальними даними відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій ТПОВ наведено на рис. 1.

Як бачимо, з рис. 1 коридор динаміки відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій в БГУ знаходиться в межах коридору експериментальних даних, що забезпечує адекватність математичної моделі.

Отримана модель дає можливість спрогнозувати коридор динаміки відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій в БГУ на стадії метаногенезу, що містить такі фактори впливу як температура середовища  $[T^-; T^+] = [35; 37]^\circ C$  і кислотність середовища  $pH = 7,2$ . Таким чином, користуючись моделлю, можемо забезпечити на цій стадії оптимальний відсоток МСО рРНК метаноутворюючих бактерій в БГУ, яка, своєю чергою, визначить оптимальний розвиток популяції мікроорганізмів в процесі анаеробного мікробіологічного бродиння.

Для застосування отриманої макромоделі, з метою прогнозування відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій в субстраті в умовах зміни кислотності середовища бродіння, достатньо задати тільки початкові дані для цих умов.

**Висновки.** Розглянуто задачу моделювання процесів анаеробного мікробіологічного бродіння з дотриманням балансу на стадії метаногенезу. Запропоновано та обґрунтовано модель на цих стадіях будувати в вигляді інтервальної дискретної динамічної моделі.

Обґрунтовано метод структурної ідентифікації ІДДМ на принципах функціонування бджолиної колонії у процесі пошуку їжі, який забезпечує можливість отримання простіших структур ІДДМ із заданими прогностичними властивостями по відношенню до існуючих методів. Ефективність застосування запропонованого методу та його обчислювальної схеми проілюстрована на прикладі побудови моделі процесу анаеробного мікробіологічного бродіння ТПОВ в БГУ об'ємом 5 дм<sup>3</sup> на кінцевих стадіях.

Вперше отримано макромодель процесу бродіння на стадіях метаногенезу (12) на основі ІДДМ, яка забезпечує гарантовані прогностичні властивості для різних умов анаеробного мікробіологічного бродіння, при зміні кислотності середовища.

Показано, що отримана модель якісно адекватно описує відсоток МСО рРНК метаноутворюючих бактерій в БГУ.

#### Список літератури

1. Баадер Б., Доне Брендерфер М. Биогаз: Теория и практика / Пер. с нем. М. И. Серебряного. – М. : Колос, 1982. – 148 с.
2. Гелетука Г. Г., Кучерук П. П., Матвеев Ю. Б. Перспективи виробництва та використання біогазу в Україні. Аналітична записка БАУ № 4, 2013. – 22 с.
3. Боднар А. М. Перший крок до екологічного майбутнього – сортування сміття. – Тернопіль, 2013. – 12 с.
4. Гураль І. В., Дивак М. П. Біохімічний аналіз процесів в біогазових установках та його застосування в задачі макромоделювання процесів виробництва біогазу // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – Хмельницький, 2014. – № 2 (47). – С. 152 – 158.
5. Гураль І. В., Дивак М. П., Піговський Ю. Р. Модель неавтономної системи виробництва біогазу та метод її ідентифікації // Науковий журнал «Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського». – Кременчук, 2015. – Вип. 3/2015 (92) – С. 129 – 136.
6. Дивак М., Стахів П., Каліщук І. Ідентифікація параметрів моделей «вхід-вихід» динамічних систем на основі інтервального підходу // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2004. – Т. 9, № 4. – С. 109 – 117.
7. Дивак М. П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними. – Тернопіль : Видавництво ТНЕУ «Економічна думка», 2011. – 216 с. – ISBN 978-966-654-283-3.
8. Gerber M., Span R. An Analysis of Available Mathematical Model for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas. International Gas Union Research conference. – Paris, 2008, P. 5–7.
9. Швед О. В., Миколів О. Б., Комаровська-Порохнявець О. З., Новіков В. П. Екологічна біотехнологія : Навч. посіб. у 2 кн. – Львів : Львівська політехніка, 2010.
10. M. E. Griffin, K. D. McMahon, R. I. Mackie, and L. Raskin. «Methanogenic population dynamics during start-up of anaerobic digesters treating municipal solid waste and biosolids», *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 57, no. 3, 1998. – P. 342–355.
11. Сиволоб А. В., Рушківський С. Р., Кур'яченко С. С. та ін. Генетика : підручник // За ред. А. В. Сиволоба. – К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2008. – С. 56 – 60.
12. Опейда Й., Швайка О. Ін-т фізико-органічної хімії та вуглекислоти ім. Л. М. Литвиненка НАН України, Донецький національний університет. – Донецьк : «Вебер», 2008. – 758 с. – ISBN 978-966-335-206-0.
13. Hural I., Dyvak M., Stakhiv P. Macromodelling of fermentation process of municipal solid organic waste at biogas plants on the acidogenesis stage // *Journal of Applied Computer Science / Technical University Press*. – Lodz, Poland, 2016. – Vol. 24 (1).
14. Дивак М. П., Дивак Т. М. Особливості побудови інтервальної системи алгебричних рівнянь та методу її розв'язку в задачах ідентифікації лінійного інтервального різнищового оператора // *Індуктивне моделювання складних систем : 36. наук. пр.* – К. : МННЦ ІТС НАН та МОН України, 2009. – Вип. 1. – С. 35 – 43.
15. Ивахненко А. Г., Мюллер Й. А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. – К. : Техника. – 1985; Берлин : ФЭБ Ферлаг Техник. – 1984. – 223 с.
16. Porplytsya N., Dyvak M., Dyvak T. "Method of structure identification for interval difference operator based on the principles of honey bee colony functioning" // *Computational problems of electrical engineering Journal*. – Vol. 4. – No. 2. – 2014. – P. 57 – 68.
17. Дивак Т. М., Піговський Ю. Р., Дивак М. П., Марценюк Є. О. Практичні аспекти застосування методу та алгоритму параметричної ідентифікації дискретних динамічних систем з інтервальною невизначеністю // *Індуктивне моделювання складних систем*. – 2010. – Вип. 2. – С. 39 – 49. – Режим доступу : <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/17401>. – Дата звертання : 23 травня 2016.
18. Порпиця Н. П., Дивак М. П. Синтез структури інтервального різнищового оператора з використанням алгоритму бджолиної колонії // *Індуктивне моделювання складних систем*. – 2013. – Вип. 5. – С. 256 – 269.

#### References (transliterated)

1. Baader B., Done Brenderfer M. *Biogas: Teoriya i praktika* [Biogas: Theory and Practice]. *Perevod s nemetskoho*. Ed. Serebryannyu, M. I. Moscow, Kolos Publ., 1982. 148 p.
2. Geletukha G. G., Kucheruk P. P., Matveyev Y. B. *Perspektyvy vyrobnytstva ta vykorystannya biogazu v Ukraini* [Production prospects of biogas in Ukraine]. *Analitychna zapyska BAU*. No. 4, 2013, 22 p.
3. Bodnar A. M. *Pershyy krok do ekologichnogo maybutn'ogo – sortuvannya smittya* [The first step toward environmental future – sorting trash]. Ternopil, 2013. 12 p.
4. Hural I., Dyvak M. *Biokhimichnyy analiz protsesiv v biohazovykh ustanovkakh ta yogo zastosuvannya v zadachi makromodelyuvannya protsesiv*

- vyrobnytstva biohazu [The biochemical analysis of the processes at biogas plants and its implementation in biogas production macro modelling problem]. *Mizhnarodnyy naukovo-tekhnichnyy zhurnal «Vymiryuval'na ta obchyslyuval'na tekhnika v tekhnologichnykh protsesakh»* [International scientific-technical journal "Measuring and computing devices in technological processes]. Khmelnytsky, 2014, no. 2 (47), pp. 152–158.
5. Hural I., Dyvak M., Pigovskyy Yu. Model' neavtonomnoyi systemy vyrobnytstva biogazu ta metod yiyi identyfikatsiyi [Model of non-autonomous biogas production system and method of its identification]. *Naukovyy zhurnal «Visnyk Kremenchuts'kogo natsional'nogo universytetu imeni Mykhayla Ostrograds'kogo»* [Scientific journal "Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University"]. Kremenchug, 2015, vol. 3/2015 (92), pp. 129–136.
  6. Dyvak M., Stakhiv P., Kalishchuk I. Identyfikatsiya parametriv modeley «vkhid-vykhid» dynamichnykh system na osnovi interval'nogo pidkhodu [Identification of "input-output" models of dynamic systems using interval approach]. *Visnyk Ternopil's'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universytetu* [Bulletin of Ternopil State Technical University]. 2004, vol. 9, no. 4, pp. 109–117.
  7. Dyvak M. *Zadachi matematychnogo modelyuvannya statychnykh system z interval'nymy danymy* [Problems of mathematical modeling of static systems with interval data]. Ternopil, Vydavnytstvo TNEU «Ekonomichna dumka» Publ., 2011, 216 p. ISBN 978-966-654-283-3.
  8. Gerber M., Span R. An Analysis of Available Mathematical Model for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas. International Gas Union Research conference. Paris, 2008, pp. 5–7.
  9. Shved O. V., Mykoliv O. B., Komarows'ka-Porokhnyavets O. Z., Novikov V. P. *Ekologichna biotekhnologiya: navch. posib. u 2-ed kn.* [Environmental Biotechnology: Textbook in 2 Volumes]. Lviv, Lviv Polytechnic Publ., 2010.
  10. Griffin M. E., McMahon K. D., Mackie R. I., Raskin L. Methanogenic population dynamics during start-up of anaerobic digesters treating municipal solid waste and biosolids. *Biotechnology and Bioengineering*. 1998, vol. 57, no. 3, pp. 342–355.
  11. Syvolob A. V., Rushkovskyy S. R., Kyr'yachenko S. S. etc. *Genetyka : pidruchnyk* [Genetics: textbook]. Ed. Syvolob A. V. Kyiv, Vydavnycho-polihrafichnyy tsentr "Kyivskyy universytet" Publ., 2008, pp. 56–60.
  12. Opeyda J., Shvaika O. *Instytut fizyko-organichnoyi khimiyi ta vuglekhimiyi im. L. M. Lytvynenka NAN Ukrainy, Donets'kyy natsional'nyy universytet* [L. M. Litvinenko Institute of Physical Organic Chemistry and Coal Chemistry, National Academy of Sciences of Ukraine, the Donetsk National University]. Donetsk, "Weber" Publ., 2008. 758 p. - ISBN 978-966-335-206-0.
  13. Hural I., Dyvak M., Stakhiv P. Macromodelling of fermentation process of municipal solid organic waste at biogas plants on the acidogenesis stage. *Journal of Applied Computer Science*. Lodz, Technical University Press Publ., Poland, 2016, Vol. 24 (1).
  14. Dyvak M. P., Dyvak T. M. Osoblyvosti pobudovy interval'noyi systemy algebrichnykh rivnyan' ta metodu yiyi rozv'yazku v zadachakh identyfikatsiyi liniynogo interval'nogo riznytsevoogo operatora [Features of construction of interval system of algebraic equations and methods of its solving in the problems of identification of interval linear difference operator]. *Induktyvne modelyuvannya skladnykh system: Zb. nauk. pr.* [Inductive modeling of complex systems: collection of scientific papers] Kyiv, MNNTS ITS NAN ta MON Ukrainy Publ., 2009, vol. 1, pp. 35–43.
  15. Ivakhnenko A. G., Myuller Y. A. *Samoorganizatsyya prognoziruushchykh modeley* [Long-term forecasting and control of complex systems]. Kiev, Tehnika Publ., 1985, Berlin, FEB Verlag Technik Publ., 1984. 223 p.
  16. Porplytsya N., Dyvak M., Dyvak T. Method of structure identification for interval difference operator based on the principles of honey bee colony functioning. *Computational problems of electrical engineering Journal*. 2014, vol. 4, no. 2, pp. 57–68.
  17. Dyvak T. M., Pigovsky Ya. R., Dyvak M. P., Martsenyuk Ye. O. Praktychni aspekty zastosuvannya metodu ta alorytmu parametrychnoyi identyfikatsiyi dyskretnykh dynamichnykh system z interval'noyu nevyznachenistyu [Practical aspects of using the method and algorithm of parameter identification of discrete dynamic systems with interval uncertainty]. *Induktyvne modelyuvannya skladnykh system* [Inductive modeling of complex systems]. 2010, vol. 2, pp. 39–49. Available at: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/17401>. (accessed 23.05.2016).
  18. Porplytsya, N. P., Dyvak M. P. Syntez struktury interval'nogo riznytsevoogo operatora z vykorystannyam alorytmu bdzholynoyi koloniyi [Synthesis of Structure of Interval Difference Operator Using Artificial Bee Colony Algorithm]. *Induktyvne modelyuvannya skladnykh system* [Inductive Modeling of Complex Systems]. 2013, vol. 5, pp. 256–269.

Надійшла (received) 29.06.2016

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Макромоделювання стадії метаногенезу зброджування твердих побутових органічних відходів у біогазових установках / І. В. Гураль // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 16 (1188). – С. 23 – 30. Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2222-0631.**

**Макромоделирование стадии метаногенеза сбраживания твердых бытовых органических отходов в биогазовых установках / И. В. Гураль // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 16 (1188). – С. 23 – 30. Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2222-0631.**

**Macromodelling of methanogenesis stage of municipal solid organic waste fermentation at biogas plants / I. V. Hural // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2016. – № 16 (1188). – pp. 23 – 30. Bibliog.: 18 titles. – ISSN 2222-0631.**

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

**Гураль Ірина Володимирівна** – аспірант кафедри комп'ютерних наук факультету комп'ютерних інформаційних технологій Тернопільського національного економічного університету, м. Тернопіль; тел.: (096) 199-44-76; e-mail: irishural@gmail.com.

**Гураль Ірина Владимировна** – аспирант кафедры компьютерных наук факультета компьютерных информационных технологий Тернопольского национального экономического университета, г. Тернополь; тел.: (096) 199-44-76; e-mail: irishural@gmail.com.

**Hural Iryna Volodymyrivna** – PhD student at the Computer Science Department, Faculty of Computer Information Technologies, Ternopil National Economic University, Ternopil; tel.: (096) 199-44-76; e-mail: irishural@gmail.com.