

УДК 519.863

Т. М. Боровська, к. т. н., доц.; П. В. Северілов

МОДЕЛЮВАННЯ Й ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ ВИРОБНИЦТВА БІОГАЗУ

Проаналізовано конструкції біореакторів для переробки різних відходів, побудовано базову математичну модель функціонування біореактора і системи регулювання. Розглянуто задачі паралельного і послідовного об'єднання реакторів.

Ключові слова: біореактор, біогаз, бактерії, регулювання, математична модель, розподілена система, оптимальне управління, інтеграція, агрегування.

Постановка проблеми. Промислове виробництво біогазу – немодна новація. Поряд з алколем та біодизелем воно існує більше тридцяти років. Але тільки сьогодні цей напрямок повинен вийти на перший план. Таке виробництво має подвійну необхідність і подвійне значення:

– сьогодні необхідне збільшення виробництва в аграрному секторі в 3 – 4 рази (продукти харчування, біопаливо), що за існуючих технологій веде до суттєвого погіршення екології;

– повне і швидке запровадження переробки відходів рослинництва і тваринництва одночасно і радикально покращить енергетичний баланс країни і екологічний стан територій.

Тепло, газ, якісні добрива є тільки побічним, корисним ефектом установок для біотехнічної переробки органічних відходів, а головна складова цінності – збереження екологічного середовища. Першими реальними користувачами просто будуть змушені бути підприємства з переробки сільгосппродукції. Причини: глобалізація, стандарти, необхідність пускати на свої території міжнародні інспекції контролю виробництва. Поки що біогазові системи ще не стали масовими в зв'язку з відсутністю ефективних, дешевих і надійних систем для широкого спектру обсягів переробки.

Невирішені частини проблеми. Існуючі установки біопереробки відходів є дорогими, занадто чутливими до складу відходів, складними в експлуатації. Це робить їх неконкурентними відносно альтернативних джерел енергопостачання та хімічних добрив.

Цілі розробки – створення комплексу імітаційних моделей біореакторних систем для інтенсивного пошуку ефективних модульних конструкцій та методів управління процесами біопереробки.

Постановка задачі. Ефективний шлях розв'язання цієї проблеми – сумісне узгоджене проектування технологій і конструкції установки для переробки відходів, створення комп'ютерних моделей для накопичення досвіду і статистики на віртуальній реальності. Біохімічні і термодинамічні процеси в реакторі суттєво нелінійні, нестационарні, невизначені. Біореактор є складнішим від ядерного. Використання "інтелектуальних" регуляторів без вивчення біохімічних процесів та процесів генетичної еволюції мікроорганізмів – найкращий шлях до остаточної дискредитації біореакторів. Пропонується розробка з дворівневим регулятором:

– перший рівень – це конструювання біотехнічної системи з саморегулюванням;

– другий рівень – розробка регуляторів, які будуть сервісними для біотехнічної системи. Аналогом може бути звичайний акваріум, де більшість процесів регулюються екосистемою акваріуму, а регулятори забезпечують потрібні температуру, насичення киснем та освітлення. Проблеми біореакторів не є новими, існує достатньо джерел з досить повним аналізом процесів та конструкцій біореакторів, наприклад [2]. Останнім часом зростає кількість електронних публікацій та патентів з біореакторів для переробки відходів. Аналіз і систематизація літератури виходить за межі статті.

На базі переглянутих джерел відібрані емпіричні дані про характеристики процесів

анаеробного метанового бродіння – процесів, на яких, власне, будується біореактор.

Структура процесу анаеробного бродіння. Центром аналізу і проектування біореакторів є природні процеси переробки відходів відповідними видами і штамми бактерій. Вирішальний фактор ефективності біореакторів – ефективність та адаптивність культур бактерій. Сьогодні йдуть інтенсивні пошуки таких культур у природі та виконуються витратні розробки нових штамів з потрібними властивостями, методами "генетичного програмування". На рис. 1 подано спрощену схему процесів анаеробного бродіння.

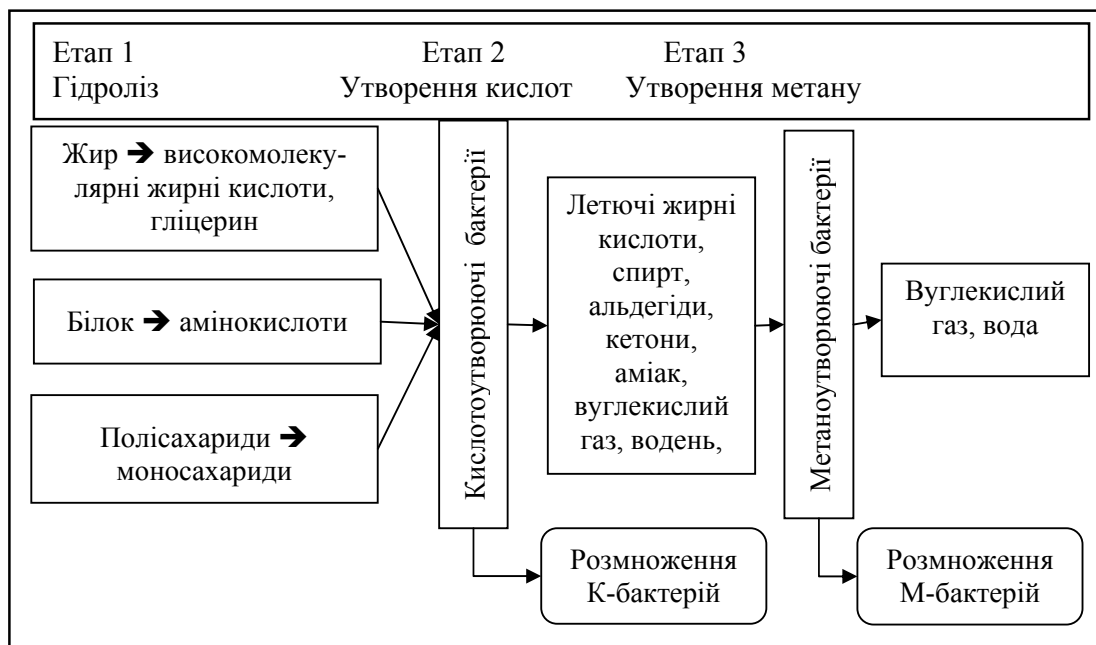


Рис. 1. Схема процесу анаеробного бродіння

Головна особливість процесів – наявність двох класів бактерій і відповідно – двох типів біохімічних процесів. Ця особливість спрямовує пошук ефективних структур біореактора, а саме, двохступінчатого реактора з розділенням процесу бродіння. У цьому випадку можливо оптимізувати температуру і склад біомаси під конкретний тип бактерій.

Базові конструкції біореакторів. На базі аналізу десятків відомих біогазових установок відібрано дві базових моделі біореакторів: малої потужності для малих господарств (рис. 2), і великої потужності для середніх і великих підприємств (рис. 3).

Перший реактор (рис. 2) – дешевий, пластиковий, стійкий до хімічно агресивного середовища, простий, придатний для масштабування і утворення систем. Додаткові переваги – можливість перенесення на інше місце, можливість утворення структур з базових модулів.

Другий реактор (рис. 3) – великої одиничної потужності, з максимальною енергоефективністю та біопродуктивністю, однак, значно дорожчий (більші постійні витрати на одиницю вимірювання кінцевих продуктів) [2]. Реактор має неперервний цикл і протиструмінний теплообмінник. Головна перевага вибраної конструктивної схеми біореактора – неперервність і стаціонарність процесів, можливість модифікацій базової схеми реактора, природність механізмів регулювання.

Розробка системи управління біореактором. Структура і алгоритми регулятора залежать від конструкції об'єкта управління, від вимірюваних параметрів. Загальний напрямок у системному проектуванні регуляторів – проектування об'єкта, якій потребує мінімальних витрат енергії та "інтелекту" для управління. Ефективний шлях розв'язання проблеми – сумісне узгоджене проектування технологій і конструкції установки для переробки відходів, створення комп'ютерних моделей для накопичення досвіду і статистики на віртуальній реальності. Біохімічні і термодинамічні процеси в реакторі суттєво нелінійні,

нестационарні, невизначені.

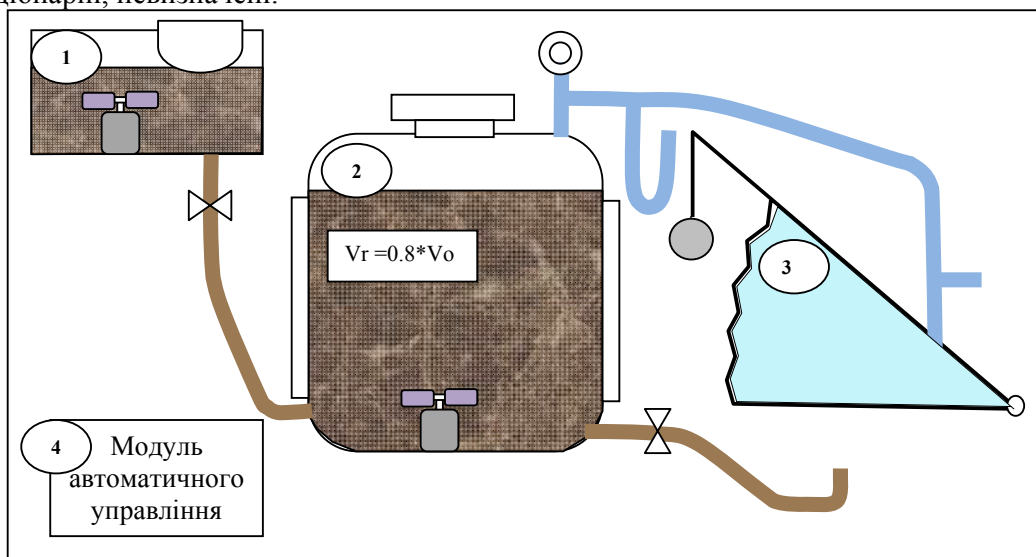


Рис. 2. Схема базової біогазової установки для домашнього господарства

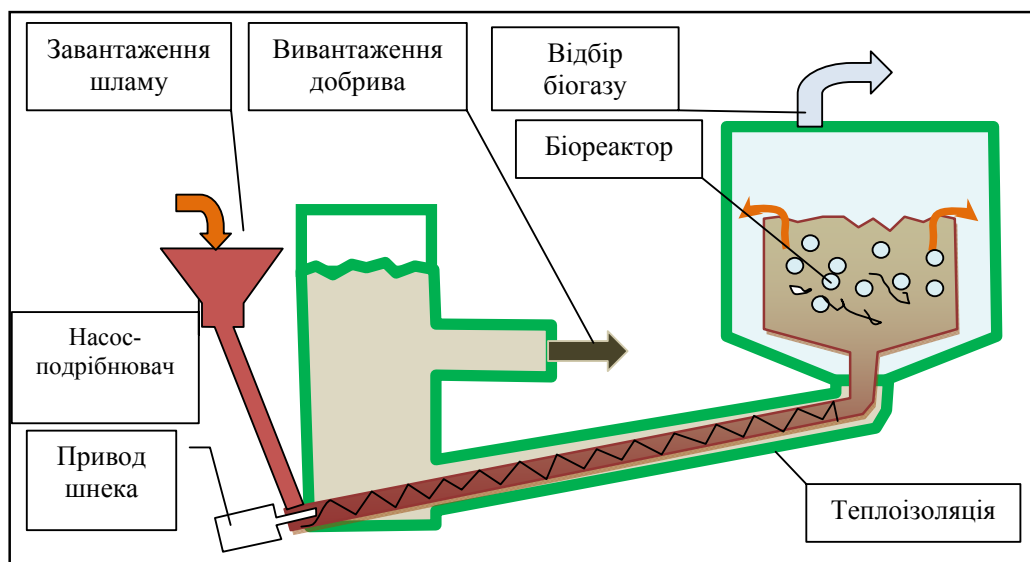


Рис. 3. Схема базової установки для агробізнесу

Система моделювання реалізована в двох доступних альтернативних середовищах – VisSim, Mathcad. На першому етапі досліджень проаналізовано варіанти кількості, розташування, типів вимірювачів та виконавчих елементів. Зібрана бібліотека моделей регуляторів температури та подачі шламу: імпульсних з амплітудною і фазовою модуляцією, релейних, екстремальних. Вибрано проектне рішення – розробити систему з прецизійною стабілізацією температури і подачі відходів. Прототипами таких підсистем є водонагрівачі, кондиціонери, теплообмінники. Ідеальна система управління така, яка не містить електроніки, механічних і термічних елементів управління. Прикладом такої системи є проект ядерного реактора, розробленого в Швеції (схема біореактора на рис. 3, теж шведська модель). Автоматична система аварійного відключення реактора не має ні одного вимикача, електродвигуна, транзистора. Під час зупинки насосів охолодження, падає тиск і "важка вода" з бар'єром витісняє звичайну воду і гасить реакцію. Аналогом може бути також звичайний акваріум, де більшість процесів регулюються екосистемою акваріуму, а регулятори забезпечують потрібні температуру, насичення киснем та освітлення. Саме такі "натуральні" системи управління бажано розробляти для біореактора.

Вибрано рішення – створити дворівневий регулятор:

- перший рівень – біотехнічна система з саморегулюванням;
- другий рівень – сервісні регулятори для біотехнічної системи.

Розробка систем біореакторів. Перший етап у розробці системи біореакторів – ретельне вивчення властивостей поведінки об’єкта управління (біохімічних процесів) і виявлення термодинамічних та біохімічних механізмів, які породжують властивості. На цій основі формується біотехнічна система саморегулювання та сервісні системи. Паралельно з першими зразками біореактора створюється імітаційна модель.

Другий етап – розробка систем біореакторів. На цьому етапі використовується інформація про джерела ресурсів для переробки відходів, про потреби і можливості потенційних клієнтів. Визначаються параметри базової лінійки (параметричного ряду) біореакторів та розробляються моделі систем біореакторів з послідовним і паралельним з’єднанням модулів. Ефективні математичні моделі дозволяють значну частину проектування і випробувань провести в режимі комп’ютерної імітації.

На рис. 4 подано приклад лінійки пластикових реакторів. Базова біогазова установка складається з пластмасового реактора, системи термостабілізації, пристрою для перемішування сировини, газгольдера. Функціональні і конструктивні модулі установки:

1. Модуль підготовки і завантаження сировини з фільтрацією і перемішуванням;
2. Модуль "реактор з системою електропідігріву і перемішування";
3. Модуль накопичення і стабілізації тиску газу;
4. Модуль автоматичного управління.

Характеристики базової лінійки біогазових установок

Об’єм реактора, м ³	3	5	8
Висота, мм	1600	2075	2200
Діаметр, мм	1630	1830	2230
Виробництво газу, м ³ /сутки	3 – 6	5 – 10	8 – 16
Виробництво добрив, літрів /добу	120	200	320

Рис. 4. Приклад базової лінійки біогазових установок

Послідовне з’єднання реакторів (рис. 5) дозволяє розділити фази бродіння і в підсумку підвищити якість і екологічну безпечність добрив. Модулі завантаження, накопичення газу та автоматики можуть бути спільними для всіх послідовно включених реакторів за незначної модифікації програмних і технічних засобів.

Паралельне з’єднання реакторів (рис. 5) дозволяє змінювати пропускну спроможність системи в необмеженому діапазоні, підвищує надійність і відмовобезпечність системи – за наявності трьох і більше реакторів не є проблемою зупинка одного з них для планового чи аварійного ремонту. Паралельна структура дозволяє спеціалізувати окремі біореактори за видом ресурсу (відходи птахофабрик, свиноферм та ін.).

Утворення систем біореакторів породжує комплекс задач оптимального розподілу узагальнених ресурсів між елементами послідовних і паралельних поєднань елементів. Теоретичні основи для отримання оптимальних розв’язків таких задач створені Р. Беллманом – це задача розподілу, задача згладжування [1]. У роботах [3, 4] подано

постановки і розв'язання задач оптимального розподілу ресурсів придатних для реалізації в регуляторах.

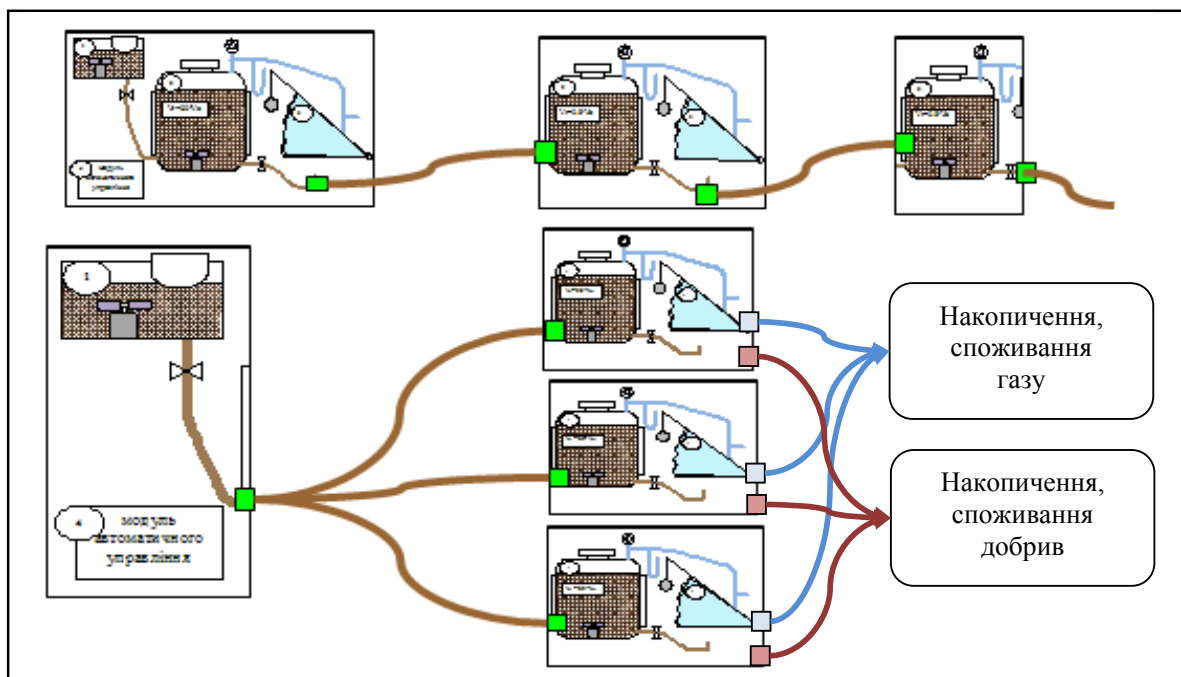


Рис. 5. Приклади послідовного і паралельного поєднання біореакторів

Емпіричні характеристики біореактора як перетворювача ресурсів. Сировиною для біореактора можуть бути: тваринні відходи, пташиний послід, різнотрав'я, відходи м'ясної промисловості, силос. За десятки років експлуатації біореакторів зібрано статистичні дані відносно їхніх характеристик як технологічних перетворювачів. Слід, однак, враховувати вплив сучасних технологій у рослинництві і тваринництві на ефективність переробки відходів, так як ін'єкції антибіотиків можуть зробити непридатними для переробки відходи птахофабрики. Тому наведені в таблицях 1, 2 усереднені дані можуть мати суттєвий розкид.

Таблиця 1

Потрібний об'єм реактора залежно від кількості тварин і птахів

Об'єм реактора, м3	Кількість тварин і птахів		
	КРС, голів	Свині, голів	Кури, 100 голів
3	10	40	16
10	40	150	24
25	100	400	160
50	200	800	320
100	400	1600	640
150	600	2300	960
200	800	3000	1280

Характеристики органічного добрива

Початкова сировина	N загальн., %	N амоній, %	P фосфор, %	калій, %	Вологість, %	pH
Пташиний послід	0,2 – 0,8	0,1 – 0,5	0,87 – 1,7	0,4 – 0,8	80 – 90	8
Свинячий гній	0,2 – 1,2		0,1 – 0,4		80 – 90	6,3 – 8,1
Гній КРС	0,4	0,25	0,2	0,45	80 – 90	

Витрата таких добрив у середньому складають 500 літрів на гектар на весь період вегетації. Слід відзначити, що формальне порівняння органічного добрива з комплексними мінеральними добривами не є коректним. Органічне добриво, крім азоту, фосфору, калію, має у своєму складі незамінні мікроелементи, складні активні сполуки. Тому порівняння ефективності добрив слід проводити в однакових умовах (на сусідніх полях), як приріст врожаю на одиницю вартості, а не ваги добрив. Однак прирощення врожаю теж не повністю характеризує ефект органічного добрива. З урахуванням екологічних втрат, сучасне високопродуктивне агропромисловість є суттєво збитковим. Тому головна складова ефекту біореакторів не біогаз, добрива, а саме мінімізація екологічних втрат і загроз.

Математичні моделі біореактора як перетворювача ресурсів. Аналіз властивостей процесів та статистичних даних дозволяє побудувати систему базових робочих моделей. Моделі реалізовані в середовищах доступних пакетів – VisSim та Mathcad.

Залежність виходу газу від температури процесу. Задаємо діапазон температур шламу $teg := 0..60$, діапазон часу процесів $tvr := 0,2..150$. Формуємо модель залежності повної кількості газу від температури. Вводимо ідентифіковані значення параметрів моделей: $a11 := 0.001$; $a12 := 0.0012$; критичні температури бродіння в шламi $tb1 := 33 gradC$; $tb2 := 53 gradC$; $Sm := 2.5$; $Amh := 1.95$; масштаб для графіка $mg := 0.4$. Записуємо текст програмного модуля.

$$Vgtot(te) := \begin{cases} Vgt1 \leftarrow 1.0 - a11 \cdot (te - tb1)^2 \\ Vgt2 \leftarrow 1.2 - a12 \cdot (te - tb2)^2 \\ vvx \leftarrow Vgt1 \cdot (te < 40) + Vgt2 \cdot (te \geq 40) \end{cases} \quad (1)$$

На рис. 6 подано залежності обсягу газу і потрібної тривалості процесу від температури шламу.

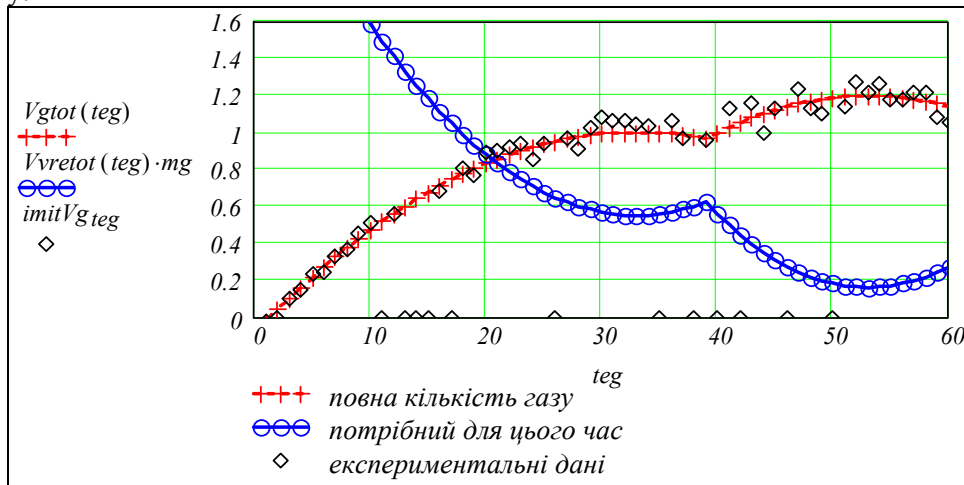


Рис. 6. Залежності обсягу і тривалості видачі газу від температури

Модуль параметричної ідентифікації характеристики «температура – вихід газу» може

включатись до складу екстремального регулятора температури.

Модель динаміки анаеробного бродіння. Модель динаміки процесу бродіння відноситься до класу нелінійних узагальнених моделей "зростання з обмеженням". У процесах бродіння приймають участь два класи бактерій, тому слід динаміку описувати як суму процесів із змінними співвідношеннями цих процесів. Записуємо базове диференціальне рівняння процесу зростання з обмеженням:

$$\frac{d}{dt}x = k1 \cdot x - k2 \cdot x^{a1}, \tag{2}$$

де $k1, k2, a1$ – параметри моделі.

Регулятори системи управління імпульсні, тому отримаємо еквівалентну різницеву математичну модель. Замінюємо похідну першою різницею:

$$\frac{d}{dt}x[(n+1) \cdot T] = \frac{x[(n+1) \cdot T] - x[n \cdot T]}{T}, \tag{3}$$

де n – номер кроку квантування, T – крок квантування.

Для подання функцій дискретного аргументу $t = n \cdot T$ використаємо індексовані змінні t_n, x_n . Задамо параметри моделювання: кількість кроків $N := 400$, крок $T := 0.02$; індексна змінна $n := 1..N$; початковий індекс масивів $ORIGIN := 1$; дискретний час $t_n = n \cdot T$. Задамо значення параметрів $k1$ і $k2$ процесу: $k1=6$; $k2=6$. Задамо початкове значення x : $x_1 := 0.0$ і запишемо різницеве рівняння процесу, побудуємо графіки:

$$x_{n+1} := x_n + [k1 \cdot x_n - k2 \cdot (x_n)^{a1}] \cdot T. \tag{4}$$

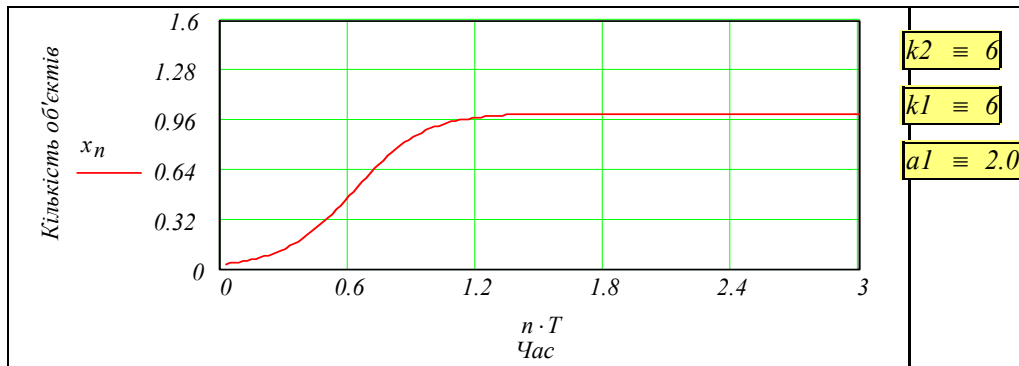


Рис. 7. Процес бродіння за малої початкової кількості бактерій

Побудуємо модель процесу як функцію користувача:

$$\bar{x}(k1, k2, a1) := \begin{cases} x_1 \leftarrow 0.03 \\ \text{for } n \in 1..N \\ x_{n+1} \leftarrow x_n + [k1 \cdot x_n - k2 \cdot (x_n)^{a1}] \cdot T \\ x \end{cases} \tag{5}$$

Маємо два типи мікроорганізмів і два процеси бродіння з різними параметрами. Зробимо відповідну модель. Задамо тестові параметри моделі:

кислотний процес $k11:=2.1$; $k12:=.3$; $a11:=1.8$;

метановий процес $k21:=5$; $k22:= 5$; $a21:=1.9$; $\alpha:=0.9$.

Запишемо вираз для змішаного процесу бродіння на базі модуля (5):

$$Xs := \alpha \cdot x(k11, k12, a11) + (1 - \alpha) \cdot x(k21, k22, a21). \tag{6}$$

Сформуємо залежності процесу бродіння від температури на основі ідентифікованих параметрів для процесів при 20, 30, 50 градусах Цельсія. Формуємо відповідні моделі:

$$Xs20 := \alpha \cdot x(k11, k12, a11) + (1 - \alpha) \cdot x(k21, k22, a21);$$

$$Xs30 := \alpha \cdot x(k11 \cdot 1.45, k12 \cdot 1.3, a11) + (1 - \alpha) \cdot x(k21, k22, a21);$$

$$Xs50 := \alpha \cdot x(k11 \cdot 1.66, k12 \cdot 1.45, a11) + (1 - \alpha) \cdot x(k21, k22, a21).$$

Частка метану в вихідному газі складає 65 – 75%. Беремо середнє значення $kpdm := 0.7$ і формуємо функції виходу метану:

$$Xs20m := kpdm \cdot Xs20; \quad Xs30m := kpdm \cdot Xs30; \quad Xs50m := kpdm \cdot Xs50.$$

Побудуємо графіки процесів з урахуванням розкидів, що можуть бути більшими (рис. 8)

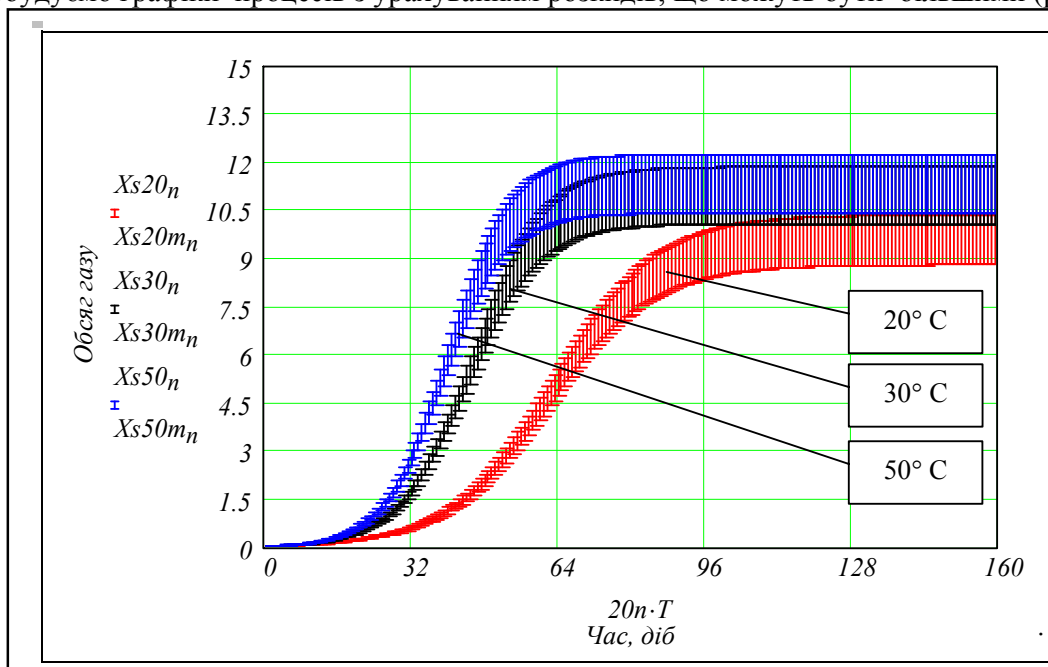


Рис. 8. Процеси утворення газу за температур 20, 30, 50°C

Задачі управління системами біореакторів. Під час утворення систем біореакторів з певних модулів виникають задачі верхнього рівня:

- задачі оптимізації технологічного процесу бродіння в системі послідовно поєднаних реакторів, що можна також назвати задачами спеціалізації модулів за фазами процесу;
- задачі спеціалізації паралельно поєднаних реакторів за видами сировини (відходи птахівництва, тваринництва та ін.);
- задачі стратегічного управління розвитком системи біореакторів у складі певного агропідприємства.

Базові розв’язання оптимізаційних задач оптимального розподілу узагальнених ресурсів для задачі 1 і 3 отримані в [3], а для задачі 2 – в роботі [4].

Висновки. Вибрано систему базових конструкцій біореакторів, розроблено систему математичних моделей, які орієнтовані на дослідження і побудову ультранадійної адаптивної системи управління. Розроблені імітаційні моделі функціонування біореакторів дозволяють оцінювати локальні і глобальні переваги, цінності їхнього запровадження. Поданий матеріал також дозволяє зрозуміти причину неефективного запровадження біореакторів – міждисциплінарність, що робить цю проблему "вільною".

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Беллман Р. Некоторые вопросы математической теории управления / Р. Беллман, И. Гликсберг, О. Гросс. – М.: Издат. иностр. литер., 1962. – 233 с.
2. Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз: Теория и практика. (Пер. с нем.) – М. Колос, 1982. – 148 с.
3. Северілов П. В., Гула К. І. Моделі оптимального розподілу ресурсів у вертикально інтегрованій системі. Вісник ВПІ. – 2009. – № 1. – С. 6.

4. Боровська Т. М. Оптимізація розподілу обмеженого ресурсу у виробничій системі на базі агрегування виробничих функцій / Боровська Т. М., Колесник І. С., Северілов В. А. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2005. – № 1. – С. 12–18.

Боровська Ті́са Миколаї́вна – к. т. н., доцент кафедри комп'ютерних систем управління;

Северілов Павло Ві́кторович – здобувач кафедри комп'ютерних систем управління.
Вінницький національний технічний університет.