

Ратушняк Г.С.
Анохіна К.В.
Вінницький
національний
технічний
університет

УДК 536.24:628.477

МОДЕЛЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛІНГВІСТИЧНИХ ЗМІННИХ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ БІОКОНВЕРСІЇ ПЕРЕМІШУВАННЯМ СУБСТРАТУ

В статье определено параметры в соответствии с предложенной принципиальной энергохранящей технологической схемой утилизации органики в биогазовой установке, которая влияет на процесс анаэробного брожения органической массы на каждом этапе биоконверсии. Выполнено моделирование выхода биогаза на базе нечеткой логики и нечетких множественных чисел в зависимости от основных факторов влияния, в частности механического перемешивания.

In the article parameters are certain in accordance with the offered of principle energysaving technology of utilization of organic in the biogas setting which influences on the process of anaerobic fermentation of organic mass on every stage of bioconversion. The design of output of biogas is executed on the base of fuzzy logic and unclear plurals depending on the basic factors of influence, in particular mechanical interfusion.

Вступ

Система біоконверсії забезпечує можливість розв'язання багатьох актуальних задач, зокрема одержання альтернативного енергоносія – біогазу. Майже 65% енергії з відновлюваних джерел можливо сформувати за рахунок продукції сільськогосподарського походження [1]. Методи анаеробного перероблення біомаси в Україні використовуються вкрай обмежено. Основною причиною є недостатня розробка енергетичних питань: великі витрати на термостабілізацію та інтенсифікацію, нерациональне використання біогазу, перевитрати електроенергії на власні потреби біогазової установки [2]. Моделювання ефективності перероблення біомаси в енергетичну продукцію дозволяє обґрунтувати рациональні параметри технологічних процесів біоконверсії. Формалізація зв'язків між параметрами обладнання та параметрами процесів біоконверсії з використанням

лінгвістичних змінних дозволяють визначити фактори, вдосконалення яких підвищує ефективність біоенергетичних виробництв та показники якості біогазу [1-3]. Моделювання виходу біогазу в залежності від основних факторів впливу, провідним з яких є інтенсифікація процесу біоконверсії перемішуванням субстрату, є актуальною задачею. Враховуючи те, що на інтенсифікацію процесу біоконверсії в біогазовій установці впливають кількісні та якісні параметри, доцільним для розроблення математичної моделі з метою оптимізації факторів впливу є метод нечіткої логіки та лінгвістичних змінних [4].

Основна частина

Моделювання з метою оптимізації процесу біоконверсії дозволяє визначити параметри, вдосконалення яких знижує затрати на технологічний процес утворення біогазу [2].

При моделюванні інтенсифікації процесу біоконверсії з використанням лінгвістичних змінних важливо врахувати якісні та кількісні фактори впливу на процес бродіння субстрату, які показані на принциповій енергозберігаючій технологічній схемі утилізації органіки в біогазовій установці (рис. 1).

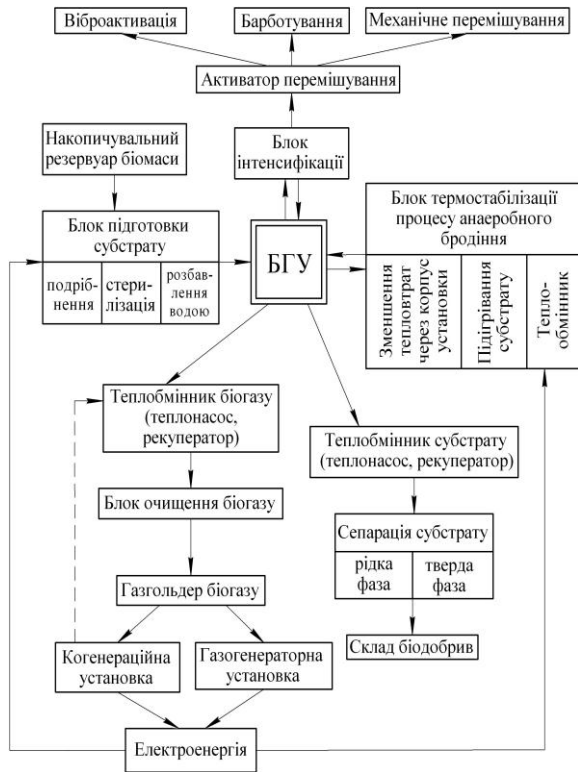


Рис. 1 Принципова енергозберігаюча технологічна схема утилізації органіки в біогазовій установці

Процес біоконверсії відповідно до принципової енергозберігаючої технологічної схеми (рис. 1) відбувається наступним чином. Субстрат із накопичувального резервуару після подрібнення, стерилізації та розбавлення водою до концентрації сухого залишку 8-10% в блоці підготовки субстрату надходить до біогазової установки. Процес анаеробного бродіння відбувається ефективніше при його інтенсифікації та термостабілізації. Інтенсифікувати процес утворення біогазу можливо за рахунок перемішування органічної маси віброактивацією, барботуванням чи механічним способом. Важливим аспектом стабільності теплового режиму в біогазовій установці є підігрівання субстрату та одночасна теплоізоляція стінок реактора від коливань температур навколишнього середовища.

Моделювання процесу біоконверсії в біогазовій установці з врахуванням чинників,

що впливають на вихід біогазу, доцільно за допомогою методу нечіткої логіки та лінгвістичних змінних. Цей метод дозволяє врахувати кожен фактор впливу на ефективність бродіння за його якісною або кількісною характеристикою. Використання нечітких систем зводиться до пошуку таких значень параметрів математичної моделі, які мінімізують розбіжність між бажаними та результатами моделювання. Модель об'єкта задається нечіткою базою знань, яка складається із сукупності правил, які пов'язують лінгвістичні оцінки вхідних і вихідних змінних процесу біоконверсії.

Для встановлення ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на вихід біогазу в результаті процесу біоконверсії, виконано їх класифікацію. За результатами класифікації побудовано дерево логічного висновку факторів впливу на процес біоконверсії. Корінь дерева логічного висновку відповідає значенню продуктивності біогазового реактора (виходу біогазу L), а висячі вершини – факторам, що впливають на її величину (рис 2).

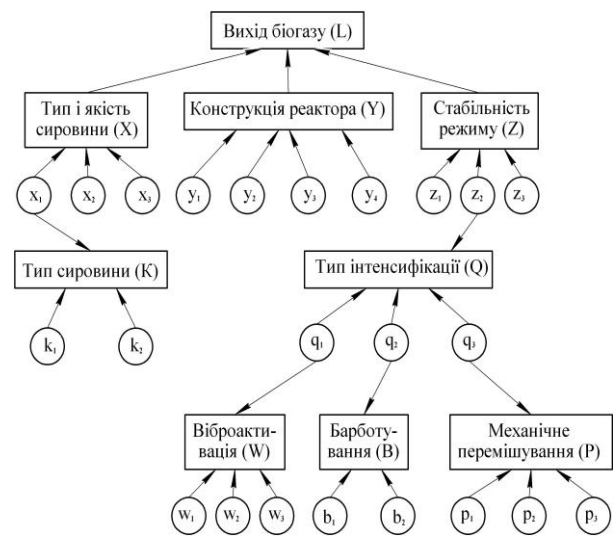


Рис. 2 – Дерево логічного висновку факторів впливу на процес біоконверсії

Оцінка значень лінгвістичних змінних виконано за допомогою системи якісних термінів. Кожний з цих термінів становить відповідну нечітку множину, тобто деяку властивість, яка розглядається як лінгвістичний терм. Для лінгвістичних змінних, які впливають на продуктивність біореактора, оціночні терми наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Фактори впливу на процес біоконверсії як лінгвістичні змінні

Параметр	Позначення й назва змінної	Універсальна множина	Терми для оцінки
Тип і якість сировини, (X)	x_1 – тип сировини	(1...7), у.о.	низька, середня, висока
	x_2 – подрібненість	(0,01–1), мм	здрібнено, нездрібнено
	x_3 – вологість сировини	(80...98), %	низька, нормальна, висока
Тип сировини, (K)	k_1 – кислотність середовища	(4,5...7,5) рН	низька, середня, висока
	k_2 – вміст токсичних речовин	(200...3000), мг/л	низька, середня, висока
Конструкція біогазового реактора, (Y)	y_1 – конструктивне виконання	(1...5), у.о.	циліндричний, траншейного типу кулеподібний
	y_2 – термічний опір стінки	(1,0–4,0), м ² ·°C/Вт	низька, помірна, висока
	y_3 – автоматизованість управління	(1...5), у.о.	низька, помірна, висока
	y_4 – розмір реактора	(1...5), у.о.	великий, середній, малий
Стабільність температурного режиму, (Z)	z_1 – градієнт температур	(40...55), °C	низький, задовільний, високий
	z_2 – інтенсифікація теплообміну	$K = \frac{Nu}{Nu_0} = 1,5...5$	низька, середня, висока
	z_3 – тип теплообмінника	(1...2), у.о.	вмонтований, трубчастий
Тип інтенсифікації (Q)	q_1 – віброактивація	$K = \frac{Nu}{Nu_0} = 0...5$	низьке, середнє, високе
	q_2 – барботування	$V_{прое}(0...40)^* \cdot 10^{-4}$, м/с	низьке, середнє, високе
	q_3 – перемішування	Re = 50...500	низьке, середнє, високе
Віброактивація(W)	w_1 – частота коливань	(5...10), Гц	низьке, середнє, високе
	w_2 – амплітуда коливань	(10...100), мм	низьке, середнє, високе
	w_3 – форма коливань	(1...3), у.о.	биття, із зсувом фаз, гармонічний
Барботування, (B)	b_1 – швидкість фази	(0,001...3), м/с	низьке, середнє, високе
	b_2 – рівномірність підведення газу	(2,94...17), у.о.	низьке, середнє, високе
Механічне перемішування, (P)	p_1 – частота обертання перемішувача	(1...10), об/хв	мала, середня, висока
	p_2 – конструктивні особливості мішалки	(1...3), у.о.	пропелерна, шнекова, лопатева
	p_3 – площа перемішування	(1...2), у.о.	горизонтальна, вертикальна

Моделювання впливу змінних чинників на продуктивність біогазової установки з використанням лінгвістичних змінних займались іноземні та вітчизняні вчені [2, 4, 6]. Зокрема, вплив типу та якості сировини на вихід біогазу в результаті бродіння біомаси досліджував Ларюшкін Є.П. Інтенсифікацію процесу анаеробного зброджування органічної маси розглянуто у монографії [2]. В даній статті

розглянуто моделювання з використанням методу нечіткої логіки та лінгвістичних змінних інтенсифікації процесу біоконверсії механічним перемішуванням субстрату.

Лінгвістичним висловлюванням відповідно до дерева логічного висновку (рис. 2) та оціночних термів (табл. 1) відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних відповідному терму. Кожному нечіткому логічному рівнянню відповідає база знань у вигляді експертних висловлювань про зв'язки нечітких термів вхідних та вихідних лінгвістичних змінних [5].

Відповідно до рис. 2 рівень показника виходу біогазу L визначається за такою формулою

$$L = f(X, Y, Z), \quad (1)$$

де X – лінгвістична змінна, що описує вплив типу і якості сировини;

Y – лінгвістична змінна, що описує вплив конструкції реактора;

Z – лінгвістична змінна, що описує вплив факторів стабілізації температурного режиму.

Лінгвістичну змінну, що описує вплив типу і якості сировини, визначено таким співвідношенням

$$X = f(x_1, x_2, x_3), \quad (2)$$

де \tilde{o}_1 – "тип сировини";

\tilde{o}_2 – "подрібненість сировини";

\tilde{o}_3 – "вологість сировини".

Лінгвістична змінна, що описує "тип сировини", визначається за наступним співвідношенням

$$\tilde{o}_1 = f(k_1, k_2), \quad (3)$$

де k_1 та k_2 – кислотність середовища та вміст токсичних речовин.

Лінгвістичну змінну, що описує вплив конструкції реактора, визначено таким співвідношенням

$$Y = f(y_1, y_2, y_3, y_4), \quad (4)$$

де y_1 – конструктивне виконання;

y_2 – термічний опір стінки;

y_3 – автоматизованість управління;

y_4 – розмір реактора.

Лінгвістичну змінну, що описує вплив факторів стабілізації температурного режиму отримано за такою формулою

$$Z = f(z_1, z_2, z_3), \quad (5)$$

де z_1 – градієнт температур між нагрівником та середовищем;

z_2 – інтенсифікація теплообміну;

z_3 – тип теплообмінника.

В рівняння (5) входять змінні, які, в свою чергу, залежать від інших факторів

$$z_2 = f(q_1, q_2, q_3), \quad (6)$$

де q_1 – віброактивація;

q_2 – барботування;

q_3 – механічне перемішування.

Віброактивація визначається формою та характеристиками сигналу. Тому змінна q_1 може бути розгорнута таким співвідношенням

$$q_1 = f(w_1, w_2, w_3), \quad (7)$$

де w_1 – частота коливань;

w_2 – амплітуда коливань;

w_3 – форма коливань.

Процес барботування залежить від факторів швидкості фази b_1 та рівномірності підведення газу b_2 . Тому змінна q_2 може бути виражена таким співвідношенням

$$q_2 = f(b_1, b_2). \quad (8)$$

Якість процесу механічного перемішування сировини залежить від частоти обертання перемішувача p_1 , конструктивних особливостей мішалки p_2 та площини перемішування p_3 . Тому змінну q_3 описано таким співвідношенням

$$q_3 = f(p_1, p_2, p_3). \quad (9)$$

Нечіткі терми факторів, що наведено на рис. 2 представлено функціями належності у вигляді нечітких множин. Найбільш розповсюджені методи побудови функцій належності ґрунтуються на статистичній обробці експертної інформації [6] та на парних порівняннях [6, 7]. В роботі застосовується метод парних порівнянь, оскільки він є менш трудомісткий та найбільш поширеним на практиці.

Методом парних порівнянь [4, 6, 7] функції належності будуються з використанням оцінок експертів, які вказують перевагу одного елемента над іншим. Початковою інформацією для побудови функцій належностей є експертні парні порівняння. Для кожної пари елементів універсальної множини $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ експерти оцінюють перевагу одного елемента над іншим за відношенням до властивості нечіткої множини.

Фактор x_1 – тип сировини визначимо на універсальній множині $U(x_1) = \{1, 2, 4, 5, 7\}$ (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(x_1) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$.

Фактор x_2 – подрібненість сировини визначимо на універсальній множині $U(x_2) = \{0.01, 0.26, 0.51, 0.75, 1\}$ (мм). Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(x_2) = \langle \text{здрибно, нездрибно} \rangle$.

Фактор x_3 – вологість сировини визначимо на універсальній множині $U(x_3) = \{80, 85, 89, 94, 98\}$ (%). Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(x_3) = \langle \text{низька, нормальна, висока} \rangle$.

Фактор k_1 – кислотність середовища визначимо на універсальній множині $U(k_1) = \{4.5, 5.25, 6, 6.75, 7\}$ (рН). Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(k_1) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$.

Фактор k_2 – вміст токсичних речовин визначимо на універсальній множині $U(k_2) = \{200, 900, 1600, 2300, 3000\}$ (мг/л). Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(k_2) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle$.

Фактор y_1 – конструктивне виконання визначимо на універсальній множині $U(y_1) = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(y_1) = \langle \text{циліндричний, траншейний, кулеподібний} \rangle$.

Фактор y_2 – термічний опір стінки визначимо на універсальній множині $U(y_2) = \{1, 1.75, 2.5, 3.25, 4\}$ (°С/Вт).

Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(x_3) = \langle \text{низька, помірна, висока} \rangle$.

Фактор y_3 – автоматизованість управління визначимо на універсальній множині $U(y_3) = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ (у.о.).

Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(y_3) = \langle \text{низька, помірна, висока} \rangle$.

Фактор y_4 – розмір реактора визначимо на універсальній множині $U(y_4) = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ (у.о.).

Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(y_4) = \langle \text{великий, середній, малий} \rangle$.

Фактор z_1 – градієнт температури визначимо на універсальній множині $U(z_1) = \{40, 44, 47, 51, 55\}$ (°С).

Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(z_1) = \langle \text{низький, задовільний, високий} \rangle$.

Фактор z_3 – тип теплообмінника визначимо на універсальній множині $U(z_3) = \{1, 1.25, 1.5, 1.75, 2\}$ (у.о.).

Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(z_3) = \langle \text{вмонтований, трубчастий} \rangle$.

Фактор w_1 – частоту коливань визначимо на універсальній множині $U(w_1) = \{5, 6.25, 7.5, 8.75, 10\}$ (Гц).

Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(w_1) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$.

Фактор w_2 – амплітуду коливань визначимо на універсальній множині $U(w_2) = \{10, 33, 55, 78, 100\}$ (мм).

Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(w_2) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$.

Фактор w_3 – форму коливань визначимо на універсальній множині $U(w_3) = \{1, 1.5, 2, 2.5, 3\}$ (у.о.).

Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-

множиною $T(w_3) = \langle \text{биття, із зсувом фаз, гармонічні} \rangle$.

Фактор b_1 – швидкість фази визначимо на універсальній множині $U(b_1) = \{0, 0.75, 1.5, 2.25, 3\}$ (м/с). Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(b_1) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle$.

Фактор b_2 – рівномірність підведення газу визначимо на універсальній множині $U(b_2) = \{3, 6.5, 10, 14, 17\}$ (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(b_2) = \langle \text{низька, нормальна, висока} \rangle$.

Фактор p_1 – частоту обертання перемішувача визначимо на універсальній множині $U(p_1) = \{1, 3, 5, 8, 10\}$ (об/хв). Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(p_1) = \langle \text{мала, середня, висока} \rangle$.

Фактор p_2 – конструктивні особливості мішалки визначимо на універсальній множині $U(p_2) = \{1, 1.5, 2, 2.25, 3\}$ (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(p_2) = \langle \text{пропелерна, шнекова, лопатева} \rangle$.

Фактор p_3 – площину перемішування визначимо на універсальній множині $U(p_3) = \{1, 1.25, 1.5, 1.75, 2\}$ (у.о.). Лінгвістичні значення цього фактору задається терм-множиною $T(p_3) = \langle \text{горизонтальна, вертикальна} \rangle$.

Для розробки математичної моделі оцінки ступеня виходу біогазу від класифікованих факторів (рис. 2) в біореакторах використано експертні оцінки нечітких логічних висловлювань типу «ЯКЩО–ТО». Моделювання здійснено на таких ієрархіях: системному, тип і якість сировини, тип сировини, конструкції реактора, стабільність температурного режиму, тип інтенсифікації, віброактивації, барботування та механічне перемішування.

Системному рівню відповідає співвідношення, для представлення якого лінгвістичними правилами «ЯКЩО–ТО» вхідні змінні X, Y, Z та вихідна L оцінюються

нечіткою терм-оцінкою $T = \langle \text{низький, нижче середніх, середній, вище середніх, високий} \rangle$.

Нечітку матрицю знань, яка використовується для моделювання залежності на системному рівні, представлено в табл. 2.

Таблиця 2 – Нечітка матриця знань про співвідношення на системному рівні

X	Y	Z	L
Низький	Низький	Високі	Низький
Нижче середніх	Низький	Нижче середніх	
Нижче середніх	Нижче середніх	Середні	Нижче середніх
Нижче середніх	Середні	Низький	
Високі	Нижче середніх	Середні	Середній
Середні	Середні	Середні	
Вище середніх	Вище середніх	Вище середніх	Вище середніх
Середні	Низький	Вище середніх	
Вище середніх	Середні	Високі	Високий
Високі	Високі	Середні	

Лінгвістичним висловлюванням, які наведено в табл. 2, відповідає така система нечітких логічних рівнянь

$$\mu^i(L) = \mu^i(X) \wedge \mu^i(Y) \wedge \mu^{\hat{A}}(Z) \vee \mu^{iC}(X) \wedge \mu^i(Y) \wedge \mu^{iC}(Z) \quad (10)$$

$$\mu^{\hat{N}}(L) = \mu^{\hat{N}}(X) \wedge \mu^{\hat{N}}(Y) \wedge \mu^{\hat{N}}(Z) \vee \mu^{iC}(X) \wedge \mu^C(Y) \wedge \mu^i(Z) \quad (11)$$

$$\mu^{\hat{N}}(L) = \mu^{\hat{A}}(X) \wedge \mu^{\hat{N}}(Y) \wedge \mu^{\hat{N}}(Z) \vee \mu^C(X) \wedge \mu^C(Y) \wedge \mu^{\hat{N}}(Z) \quad (12)$$

$$\mu^{\hat{A}\hat{N}}(L) = \mu^{\hat{A}\hat{N}}(X) \wedge \mu^{\hat{A}\hat{N}}(Y) \wedge \mu^{\hat{A}\hat{N}}(Z) \vee \mu^C(X) \wedge \mu^i(Y) \wedge \mu^{\hat{A}\hat{N}}(Z) \quad (13)$$

$$\mu^{\hat{A}}(L) = \mu^{\hat{A}\hat{N}}(X) \wedge \mu^{\hat{N}}(Y) \wedge \mu^{\hat{A}}(Z) \vee \mu^{\hat{A}}(X) \wedge \mu^{\hat{A}}(Y) \wedge \mu^{\hat{N}}(Z) \quad (14)$$

В наведених рівняннях літерами «Н», «НС», «С», «ВС» та «В» скорочено позначено назви термів «низький», «нижче середніх», «середній», «вище середніх» та «високий».

Нечітка матриця знань, яка моделює співвідношення факторів механічного перемішування представлена в табл. 3.

Таблиця 3 – Нечітка матриця знань про співвідношення механічного перемішування

p_1	p_2	p_3	P
Низька	Пропелерна	Горизонтальна	Низьке
Низька	Пропелерна	Вертикальна	
Середня	Шнекова	Вертикальна	Середня
Середня	Шнекова	Горизонтальна	
Висока	Лопатева	Вертикальна	Висока
Висока	Лопатева	Горизонтальна	

Лінгвістичним висловлюванням, які наведено в табл. 3, відповідає така система нечітких логічних рівнянь

$$\mu^I(P) = \mu^H(p_1) \wedge \mu^I(p_2) \wedge \mu^{\hat{A}D}(p_3) \vee \mu^I(p_1) \wedge \mu^I(p_2) \wedge \mu^{\hat{A}D}(p_3), \quad (15)$$

$$\mu^{\tilde{N}}(P) = \mu^{\tilde{N}}(p_1) \wedge \mu^{\emptyset}(p_2) \wedge \mu^{\hat{A}D}(p_3) \vee \mu^{\tilde{N}}(p_1) \wedge \mu^{\emptyset}(p_2) \wedge \mu^{\hat{A}D}(p_3), \quad (16)$$

$$\mu^{\hat{A}}(P) = \mu^{\hat{A}}(p_1) \wedge \mu^{\hat{E}}(p_2) \wedge \mu^{\hat{A}D}(p_3) \vee \mu^{\hat{A}}(p_1) \wedge \mu^{\hat{E}}(p_2) \wedge \mu^{\hat{A}D}(p_3), \quad (17)$$

В наведених рівняннях літерами «П», «Ш», «Л», «ГР» та «ВР» скорочено позначено назву термів «пропелерна», «шнекова», «лопатева», «горизонтальна» та «вертикальна». Графіки функцій належності для факторів механічного перемішування частоти обертання p_1 , конструктивних особливостей мішалки p_2 та площини перемішування p_3 наведено на рис. 3.

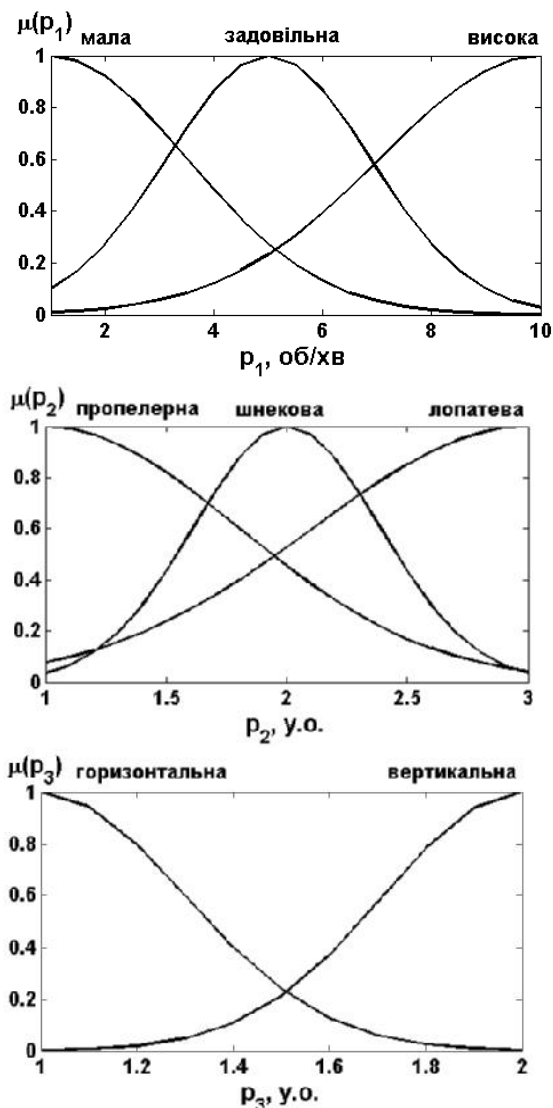


Рис. 3 - Графіки функцій належності для факторів механічного перемішування

В результаті побудови графіків функцій належності (рис. 3) отримано графічні моделі залежності впливу параметрів інтенсифікації бродіння субстрату за допомогою перемішування механічними пристроями. Отримана база знань про зв'язки нечітких термів вхідних та вихідних лінгвістичних змінних дозволяє оптимізувати параметри інтенсифікації перемішування субстрату в процесі біоконверсії.

Висновок

Відповідно до запропонованої принципової енергозберігаючої технологічної схеми утилізації органіки в біогазовій установці визначено параметри, що впливають на процес анаеробного бродіння органічної маси на кожному етапі біоконверсії.

Моделювання виходу біогазу на базі нечіткої логіки та нечітких множин в залежності від основних факторів впливу, зокрема механічного перемішування, дозволяє визначити параметри, оптимізація яких дає можливість підвищити ефективність біоенергетичних виробництв та показники якості біогазу.

Література

1. Біоенергія в Україні – розвиток сільських територій та можливості для окремих громад/ [Дубровін В.О., Мельничук М.Д., Мельник Ю.Ф. та ін.]. – К., 2009. – 111 с. – ISBN 978-9986-732-51-8.
2. Ратушняк Г.С. Інтенсифікація біоконверсії коливальним перемішуванням субстрату/ Г.С. Ратушняк, В.В. Джеджула. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 117 с. – ISBN 978-966-641-272-3/
3. Баадер Б. Биогаз: Теория и практика./ Баадер Б., Доне Е., Бренндерфер М.; пер. с нем. М. И. Серебряного. – М.: Колос, 1982. –148 с.
4. Ротштейн О.П. Soft Computing в біотехнології: багатофакторний аналіз і діагностика: Монографія/ О.П. Ротштейн, Є.П. Ларюшкін, Ю.І. Мітюшкін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 144 с.
5. Ратушняк Г.С. Обладнання із віброактиватором для виробництва біогазу/ Г.С.Ратушняк, В.В. Джеджула // Вісник ВПІ. – 2007. – №4 – С. 71-74.
6. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети/ Ротштейн А.П. – Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 320 с.
7. Борисов А.Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования/ Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.