

УДК 621.181.7

О. Ю. МАЙСТРЕНКО, д-р техн. наук

Ю. В. КУРИС, канд. техн. наук

Інститут вугільних енерготехнологій НАН, м. Київ

Ю. С. КАЛІНЦЕВА, магістр

В. М. ВЛАСЕНКО, старший викладач

Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ БІОРЕАКТОРУ ПРИ АНАЕРОБНОМУ ЗБРОДЖУВАННІ БІОМАСИ

Проблема утилизации отходов промышленного животноводства актуальна в связи с высокой концентрацией животных на ограниченной площади. Свиноводческие предприятия, потребляя известные традиционные энергоносители, обладают достаточно большим неиспользуемым энергетическим потенциалом, которым является свиной навоз. В статье авторами рассмотрены основные методы и способы переработки животноводческой биомассы и получены определенные выводы, так же сделаны выводы из анализа анаэробных технологий.

Проблема утилізації відходів промислового тваринництва актуальна у зв'язку з високою концентрацією тварин на обмеженій площі. Свинарські підприємства, споживаючи відомі традиційні енергоносії, володіють чималим невживаним енергетичним потенціалом, яким є свинячий гній. У статті авторами розглянуті основні методи і способи переробки тваринницької біомаси і отримані певні висновки, так само зроблені висновки з аналізу анаеробних технологій

Введение

Основною причиною, яка стримує використання нетрадиційних джерел енергії в енергетичних цілях на Україні, є те, що отримана енергія має високу вартість, тобто, актуальним є пошук процесів і технологій, що відрізняються низькими капітальними й експлуатаційними витратами, а також низькою собівартістю одержуваної енергетичної продукції за рахунок виробництва супутніх продуктів. Такою є технологія процесу анаеробного зброджування біомаси, що дозволяє одержувати паливний газ із відносно високою теплоотою згоряння, а також одержуються високоякісні добрива, за рахунок реалізації якого можна отримати додатковий прибуток.

Основна частина

Необхідні дані визначалися на основі виконаних досліджень процесу анаеробного зброджування біомаси на промислово-тваринницькому комплексі комбінату ТОВ «Запоріжсталь» на діючій біогазовій установці описаної у [1, 7, 8, 9]. Загальне поголів'я худоби на фермі становить 10000 свиней.

На основі контрольних вимірів встановлено, що від однієї худоби щодня утвориться 68 літрів рідкої біомаси. Загальний обсяг біомаси становить: у зимовий сезон - 75 м³/дн. (від 10000 свиней), у літній сезон – 65 м³/дн. (від 8050 свиней) [7].

Зміст сухої речовини, що утвориться щодня з екскрементів і підстилки, становить 6,2–6,3 кг на одну голову, а середній зміст органічних речовин 5 кг/гол. З обліком цього щодня утворююча маса органічної речовини становить в зимовий сезон 5500 кг/дн., у літній сезон – 4750 кг/дн..

Питома кількість сумарного біогазу, віднесена до 1 тонни органічної речовини, за результатами досліджень прийнята рівною 300 м³/т у зимовий сезон.

У літній сезон, коли в день збирається тільки 65 м³ біомаси, запроектований обсяг камери дозволяє зброджувати рідку біомасу тривалістю більш, ніж 25 днів, а для підтримки температури потрібна менша кількість тепла. Тому незважаючи на меншу кількість органічної

речовини можливе одержання більшої кількості товарного газу, тобто 350 м³ з однієї тонни органічної речовини.

У першій серії випробувань були проведені лабораторні виміри виходу біогазу і швидкості його утворення в термокамері при мезофільному (35°C) і термофільному (55°C) режимах. Тривалість випробувань була прийнята рівною 35 дням. Кількість сухої речовини, зміст органічних речовин, величина рН і об'ємна вага визначалися в хімічній лабораторії.

Загальна кількість виділяемого газу вимірялася один раз у день. Результати вимірів аналізувалися кожні 5 днів. Обробка отриманих результатів проводилася по загальноприйнятим методикам. Питома кількість біогазу визначалася в літрах на 1 кг органічної речовини.

У таблиці 1 наведені характеристики рідкої біомаси крупної рогатої худоби, використані при проведенні експериментальних досліджень у мезофільному режимі зброджування.

Таблиця 1

Характеристики рідкої біомаси худоби у мезофільному режимі зброджування

Показники збродженої біомаси	Номер експерименту			Середнє значення
	1	2	3	
Обсяг, л	6,0	5,0	5,0	5,3
Зміст сухої речовини, кг	0,582	0,425	0,425	0,477
%	9,7	8,5	8,5	8,9
Зміст органічних речовин, кг	0,468	0,340	0,340	0,383
%	7,8	6,8	6,8	7,2
Величина рН	6,8	7,0	6,9	-
Об'ємна вага, г/л	1006	1017	1008	1010

Показники рідкої біомаси, використаної при дослідженні в термофільному режимі зброджування, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Характеристики рідкої біомаси худоби у термофільному режимі зброджування

Показники збродженої біомаси	Номер експерименту			Середнє значення
	4	5	6	
Обсяг, л	6,0	5,0	5,0	5,3
Зміст сухої речовини, кг	0,454	0,425	0,425	0,435
%	7,57	8,53	8,5	8,2
Зміст органічних речовин, кг	0,636	0,341	0,340	0,348
%	6,1	6,82	6,80	6,57
Величина рН	7,1	6,8	7,0	-
Об'ємна вага, г/л	1006	1010	1018	1008

Визначення загального виходу біогазу і швидкості газовиділення.

На основі сукупності даних, отриманих у результаті випробувань, проведених на лабораторних установках з термокамерами при періодичному зброджуванні, була визначена кількість біогазу, що утвориться з рідкої біомаси худоби. Показники, що характеризують вихід біогазу за час 35-денного бродіння при мезофільному режимі, наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Показники, що характеризують вихід біогазу за час 35-денного бродіння при мезофільному режимі

Період зброджування, дні	Кількість виділеного біогазу, л			у середньому	Кількість газу, відносно 1 кг орг. речовини, л/кг
	Номер експерименту				
	1	2	3		
5	17,89	39,80	26,68	27,96	73,0
10	22,58	64,83	40,48	42,63	111,3
15	25,66	93,92	63,53	61,04	159,4
20	29,94	113,72	79,67	74,67	194,4
25	37,66	126,88	84,23	82,92	216,5
30	39,16	137,40	89,08	88,55	231,2
35	42,6	148,58	92,76	94,65	247,1

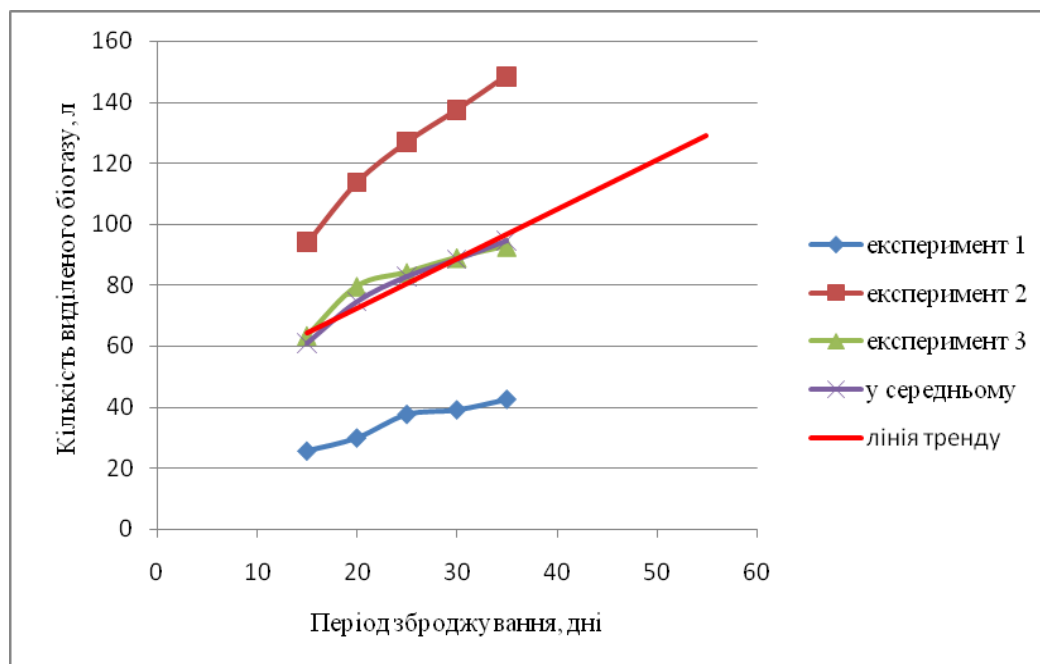


Рис. 1. Залежність кількості біогазу від періоду зброджування за час 35-денного бродіння при мезофільному режимі

Кількість біогазу, отриманого за час 35-денного бродіння при термофільному режимі, наведено в табл. 4.

Виходячи з наведених даних в табл. 3 і 4, були побудовані графіки залежності кількості біогазу від періоду зброджування для мезофільного (рис. 1) і термофільного режимів (рис. 2) та у середньому для кожного з режимів. З метою отримання прогнозів на 20-ти денний період побудовано лінії трендів які відображають динаміку цих залежностей в майбутньому періоді.

Таблиця 4

Показники, що характеризують вихід біогазу за час 35-денного бродіння при термофільному режимі

Період зброджування, дні	Кількість виділеного біогазу, л			у середньому	Кількість газу, відносно 1 кг орг. речовини, л/кг
	Номер експерименту				
	4	5	6		
5	17,64	8,81	63,16	29,87	85,6
10	36,30	19,43	77,47	44,40	127,6
15	77,30	31,08	83,24	63,37	183,5
20	117,78	39,11	93,8	83,32	239,4
25	138,04	45,95	107,34	97,11	279,1
30	154,78	50,17	117,87	107,60	309,2
35	164,72	53,26	126,09	114,69	329,5

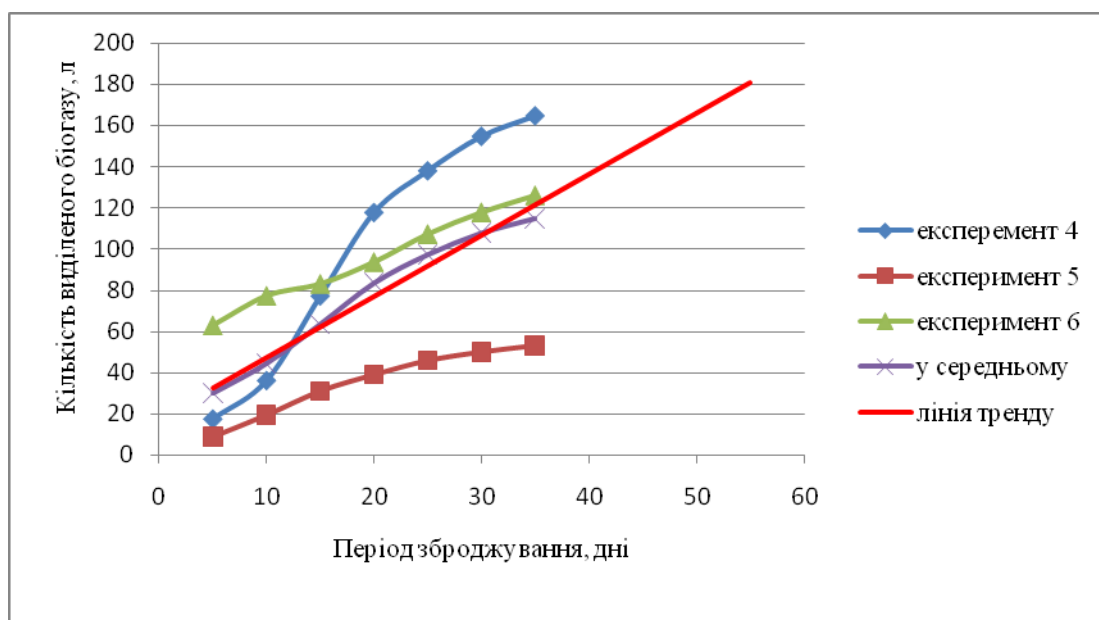


Рис. 2. Залежність кількості біогазу від періоду зброджування за час 35-денного бродіння при термофільному режимі

При проектуванні біогазової станції для анаеробної обробки рідкої біомаси необхідно знати зміну швидкості газоутворення, тобто кількість газу, що утвориться щодня з 1 кг органічної речовини. Швидкості газоутворення були отримані в результаті випробувань, проведених у мезофільному і термофільному режимах зброджування, і наведені на рисунку 3.

З рисунку 3 видно, що зі збільшенням часу зброджування швидкість газоутворення поступово знижується. Знання закономірності зниження швидкості необхідно при виборі часу зброджування. Приймаючи кількість газу, отриманого за час 35-денного зброджування за 100 %, нами було досліджено яким образом знижується кількість газу в кожні 5 днів.

Виміри проводилися в мезофільному і термофільному режимах, отримані при цьому результати наведені на рисунку 4.

Аналізуючи данні таблиці 6, можна зробити висновок, що близько 87% кількості біогазу, що утвориться за 35 днів у мезофільному режимі, отримано вже на 25-й день

обробки. При збільшенні часу бродіння на 10 днів кількість газу збільшується всього лише на 13 %. Тому що на кількість біогазу, що виділяється впливає температура бродіння.



Рис. 3. Швидкості газоутворення у мезофільному і термофільному режимах зброджування

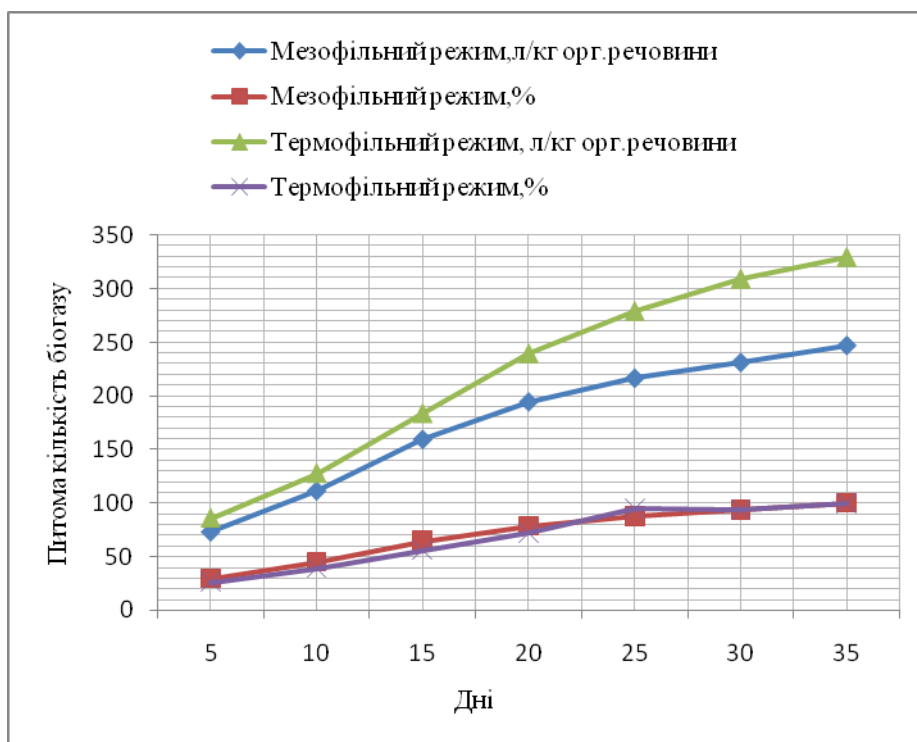


Рис. 4. Залежність питомої кількості біогазу від періоду зброджування

Можна зробити висновок, що вже на 25-й день при термофільному режимі виходить, приблизно, на 30 % газу більше, ніж при мезофільному.

Звідси треба, що для одержання однакового сумарного виходу біогазу при термофільному режимі потрібна була б камера бродіння меншого обсягу, чим при мезофільному, але

через більше високу температуру шумування витрата тепла на власні потреби процесу в термофільного режиму збільшується в 1,5 рази (у відсотковому відношенні до теплового еквівалента виділеного біогазу), у той час як кількість товарного біогазу практично однакова з мезофільним режимом.

Захист навколишнього середовища в результаті анаеробної обробки біомаси оцінюється зниженням числа хвороботворних патогенних бактерій, а також зміною ХСК (хімічне споживання кисню). На основі бактеріологічних досліджень у роботі визначені залежності числа хвороботворних бактерій від температури і тривалості анаеробної обробки, а також значення цих параметрів, при яких бактеріальне число в ході обробки біомаси знижується до такої величини, коли небезпека зараження середовища стає мінімальною, це вивчено у [2, 3, 4, 5, 6].

Крім лабораторних випробувань проводилися практичні спостереження по інтенсивності заходу при зберіганні рідкої біомаси, що перебродила.

У завдання досліджень, що проводилися, входив також контроль зміни живильних речовин у збродженій біомаси.

Досвіди проводилися для мезофільного і термофільного режимів зброджування. Проби рідкої біомаси відбиралися при заповненій камері, а потім кожні 3 дні.

Результати досліджень бактеріологічних властивостей рідкої біомаси в процесі її зброджування.

Як літературні дані, так і проведені нами виміри, підтверджують факт, що неопрацьовану рідку біомасу варто вважати бактеріологічно хвороботворним матеріалом.

Бактеріологічні дослідження проводилися на лабораторній установці з водяною ванною. Відбір зразків рідкої біомаси здійснюється на початку зброджування, потім кожні 3-4 дня і, нарешті, на 12-й день. Бактеріологічний показник підраховувався як середнє арифметичне значення числа бактерій: у мезофільній зоні при 30°C і 40°C, у термофільної - при 55°C і 60°C.

Вплив анаеробного збродження на зниження хвороботворних бактерій визначався зміною числа бактерій coliform, streptococcus faecalis. Крім того, у кожному зразку контролювалася наявність салмонелл.

Результати бактеріологічних досліджень наведені в таблицях 5 і 6.

Таблиця 5

Результати досліджень бактерії coliform

Час зброджування	Бактерії coliform, од./100 мл.							
	мезофільний режим		середнє значення	%	Термофільний режим		середнє значення	%
	350С	400С			550С	600С		
0	4,0·10 ⁶	4,0·10 ⁶	4,0·10 ⁶	100	9,8·10 ⁶	13,5·10 ⁶	11,6·10 ⁶	100,0
2	-	-	-	-	2,0·10 ⁶	-	2,6·10 ⁶	17,0
4	-	-	-	-	-	1,0·10 ⁵	1,0·10 ⁵	0,80
6	4,0·10 ⁴	3,0·10 ⁴	3,5·10 ⁴	0,88	1,0·10 ⁴	-	1,0·10 ⁴	0,08
8	1,0·10 ⁴	1,0·10 ⁴	1,0·10 ⁴	-	8,0·10 ³	-	8,0·10 ³	-
10	-	-	-	-	4,1·10 ³	-	4,1·10 ³	-
12	1,0·10 ³	6,0·10 ³	3,5·10 ³	-	-	-	-	-

Математична обробка досвідчених даних показала, що число бактерій у процесі зброджування змінюється по експоненті. Загальна форма адаптованої залежності має вигляд:

$$X = d \cdot e^{-Bt} \quad (1)$$

де X – число бактерій;

d – постійна регресії;
 t – час обробки;
 B – розрахунковий коефіцієнт.

Таблиця 6

Результати досліджень бактерії *streptococcus faccalis*

Час зброджування	Бактерії <i>streptococcus faccalis</i> , од./100 мл.							
	350С	400С	середнє значення	%	550С	600С	середнє значення	%
0	2,0·10 ⁶	2,0·10 ⁶	2,0·10 ⁶	100	2,0·10 ⁶	2,0·10 ⁶	2,0·10 ⁶	100,0
4	–	–	–	–	5,0·10 ³	2,0·10 ³	3,0·10 ³	0,15
6	8,0·10 ⁴	4,0·10 ⁴	6,5·10 ⁴	3	4,0·10 ³	4,0·10 ²	2,0·10 ³	–
8	2,0·10 ⁴	1,4·10 ⁴	1,7·10 ⁴	0,85	3,6·10 ³	–	–	–
12	1,0·10 ³	2,0·10 ³	1,5·10 ³	–	–	–	–	–

У результаті математичної обробки досвідчених даних отримані емпіричні залежності бактеріального числа *coliform* від тривалості зброджування:

$$- \text{ у мезофільному режимі: } X = 4 \cdot 10^6 \cdot e^{-0.7085t} \quad (2)$$

$$- \text{ у термофільному режимі: } X = 11 \cdot 10^6 \cdot e^{-0.9896t} \quad (3)$$

Залежність бактеріального числа *streptococcus faccalis* від тривалості зброджування має вираження:

$$- \text{ у мезофільному режимі : } y' = 2 \cdot 10^6 \cdot e^{-0.5818t} \quad (4)$$

$$- \text{ у термофільному режимі: } y' = 2 \cdot 10^6 \cdot e^{-1.3805t} \quad (5)$$

Зниження бактеріального числа в процесі зброджування наведено в табл. 7.

Таблиця 7

Вид бактерії		Кількість днів						
		0	2	4	6	8	10	12
<i>coliform</i>	350С	4,0·10 ⁶	9,7·10 ⁵	2,3·10 ⁵	5,7·10 ⁴	1,4·10 ⁴	3,3·10 ³	812
	550С	11,6·10 ⁶	1,6·10 ⁶	2,2·10 ⁵	3,1·10 ⁴	4,2·10 ³	600	81
<i>streptococcus faccalis</i>	350С	2,0·10 ⁶	6,25·10 ⁵	1,96·10 ⁴	1,9·10 ⁴	1,9·10 ⁴	6,0·10 ³	1,9·10 ³
	550С	2,0·10 ⁶	1,27·10 ⁵	8,0·10 ³	506	32	3	-

Дослідні (експериментальні) і розрахункові значення зниження бактерій *coliform* та *streptococcus faccalis* показані на рис. 5 і 6.

У термофільному режимі зниження кількості бактерій настає швидше, ніж у мезофільному, але в обох режимах кількість бактерій у зброженій біомасі досягає свого мінімального значення вже через 12 днів зброджування. У пробах рідкої біомаси, зараженої сальмонелою, після анаеробної обробки її присутність не була виявлена.

Результати досліджень удобрювальних властивостей біомаси, що перебродила.

У ході дослідження складу рідкої біомаси вимірялися зміст сухої і органічної речовин, зміст РК (розчинений кисень), величина рН, швидкість утворення осаду, контролювався поріг заходу як описано у [10, 11].

Розрахунок процентної зміни досліджуваних параметрів проводився по наступній формулі:

$$P = 1 - \frac{(100 - A) \cdot B}{(100 - B) \cdot A}, \%$$
(6)

де P – процентне зниження досліджуваного параметра, %;
 A – процентна частка досліджуваного параметра в неопрацьованій біомасі, %;
 B – процентна частка досліджуваного параметра в збродженій біомасі, %.

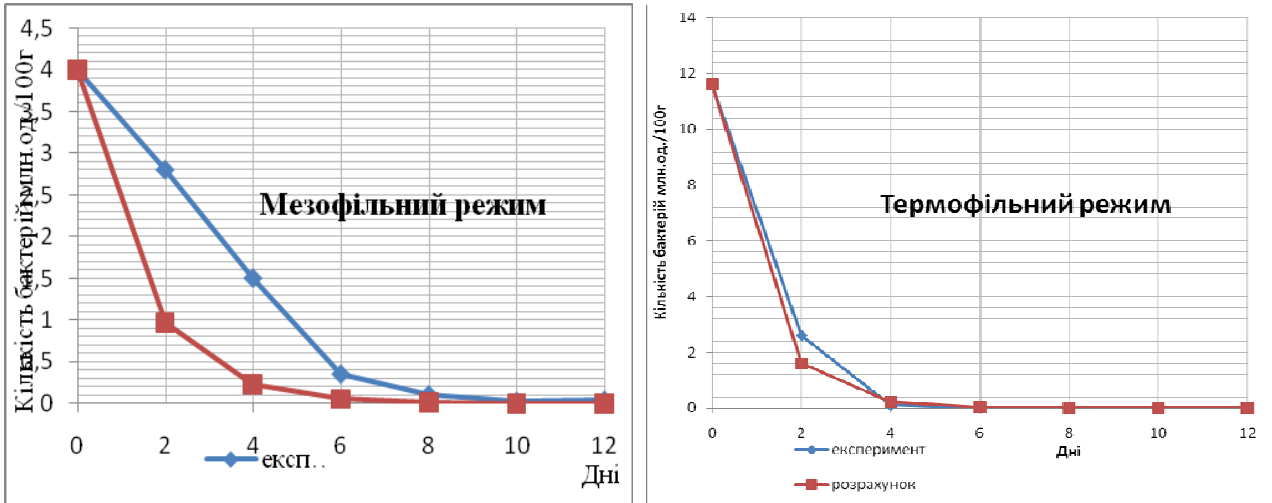


Рис. 5 Залежність кількості бактерій coliform від тривалості збродження

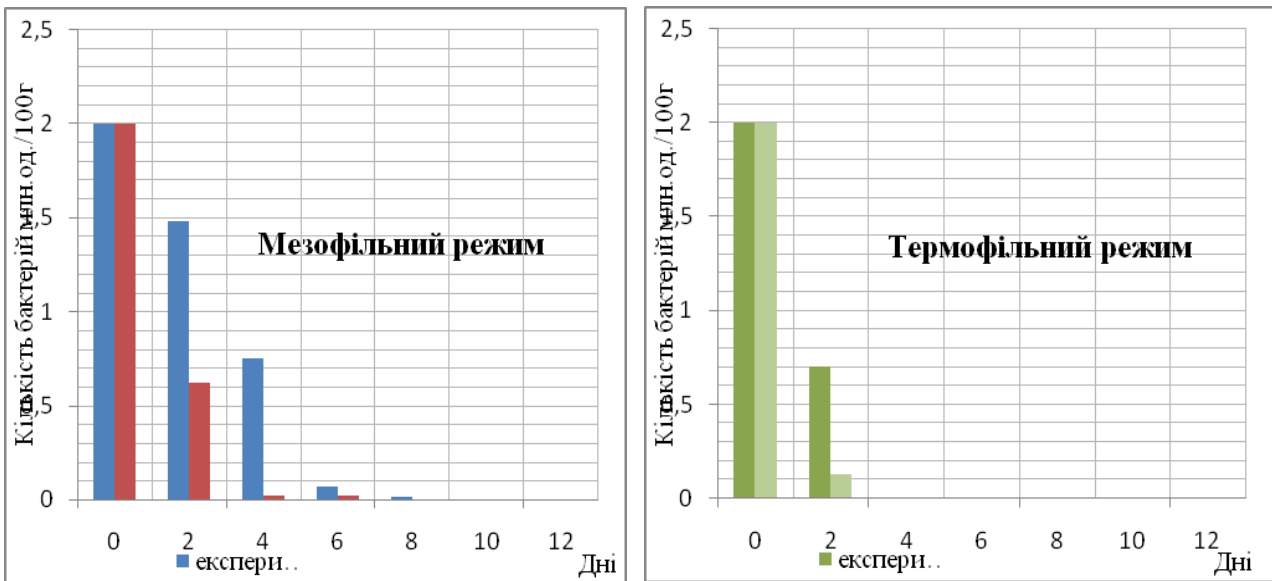


Рис. 6 Залежність кількості бактерій streptococcus faecalis від тривалості збродження

Дослідження проводилися зі зразками, обробленими при чотирьох значеннях температур, результати досліджень наведені в табл. 8.

Зміст N^{PK} у свіжій і збродженій рідкій біомасі (при періодичному і безперервному режимах) представлений відповідно в табл. 9 і 10.

Результати досліджень

Температура режиму	Характеристи ка біомаси	Неопрацьована біомаса	Зброджена біомаса	Кількість днів	Збродження, %
35 ⁰ C	Суха речовина,%	3,83	3,13	12	19
	Органічна речовина,%	2,57	2,05		21
	Азот,%	0,12	0,12		0
	Фосфор,%	0,036	0,034		6
	Калій,%	0,037	0,036		4
	pH	7,2	7,3		–
	ХСК, мг/л	31515	17262		55
40 ⁰ C	Суха речовина,%	1,10	0,93	9	16
	Органічна речовина,%	0,85	0,71		17
	Азот,%	0,12	0,11		8
	Фосфор,%	0,049	0,048		3
	Калій,%	0,032	0,030		7
	pH	7,1	7,1		-
	ХСК, мг/л	12978	84413		37
55 ⁰ C	Суха речовина,%	5,80	4,50	10	23
	Органічна речовина,%	4,29	3,09		28
	Азот,%	0,15	0,14		7
	Фосфор,%	0,030	0,030		0
	Калій,%	0,051	0,049		5
	pH	7,1	7,4		–
	ХСК, мг/л	41988	26895		38

Продовження таблиці 8					
60°C	Суша речовина,%	2,0	1,51	6	25
	Органічна речовина,%	1,54	1,16		25
	Азот,%	0,11	0,10		9
	Фосфор,%	0,076	0,069		10
	Калій,%	0,040	0,038		5
	pH	7,2	7,2		-
	ХСК, мг/л	33058	22502		47

Таблиця 9

Вид біомаси	Суша речовина,г/кг	Органічні речовини	N	P	K	N	P	K	Всього реагентів
			г/кг сухої речовини			кг/м ³ рідкого біомаси			
Свіжий	26,2	732	52,4	21,4	35,5	1,37	0,56	0,93	2,86
Зброджений	17,6	604	76,7	30,2	51,0	1,35	0,53	0,90	2,79

Таблиця 10

Вид біомаси	Суша речовина,г/кг	Органічні речовини	N	P	K	N	P	K	Всього реагентів
			г/кг сухої речовини			кг/м ³ рідкого біомаси			
Зброджений	41	690	70	21	39	2,8	0,84	1,5	5,14

Аналіз результатів досліджень показав, що зниження органічної речовини в рідкій біомасі пропорційно часу зброджування. Для кількісної характеристики органічної речовини використовувались два параметри - біологічна БПК₅ (біохімічна потреба кисню на 5 діб) і хімічна потреба кисню ХПК.

Результати по зниженню величини ХПК у процесі зброджування наведені в таблиці 4. Після 15 днів шумування ХПК знижується на 40 %. Зниження органічної речовини і величини ХПК у процесі зброджування у свою чергу знижує і шкідливий вплив рідкої біомаси на навколишнє середовище, але передбачена стандартами водного господарства величина ХПК, рівна 75 мг/л, не досягається.

За результатами вимірів побудована номограма, представлена на рис. 7.

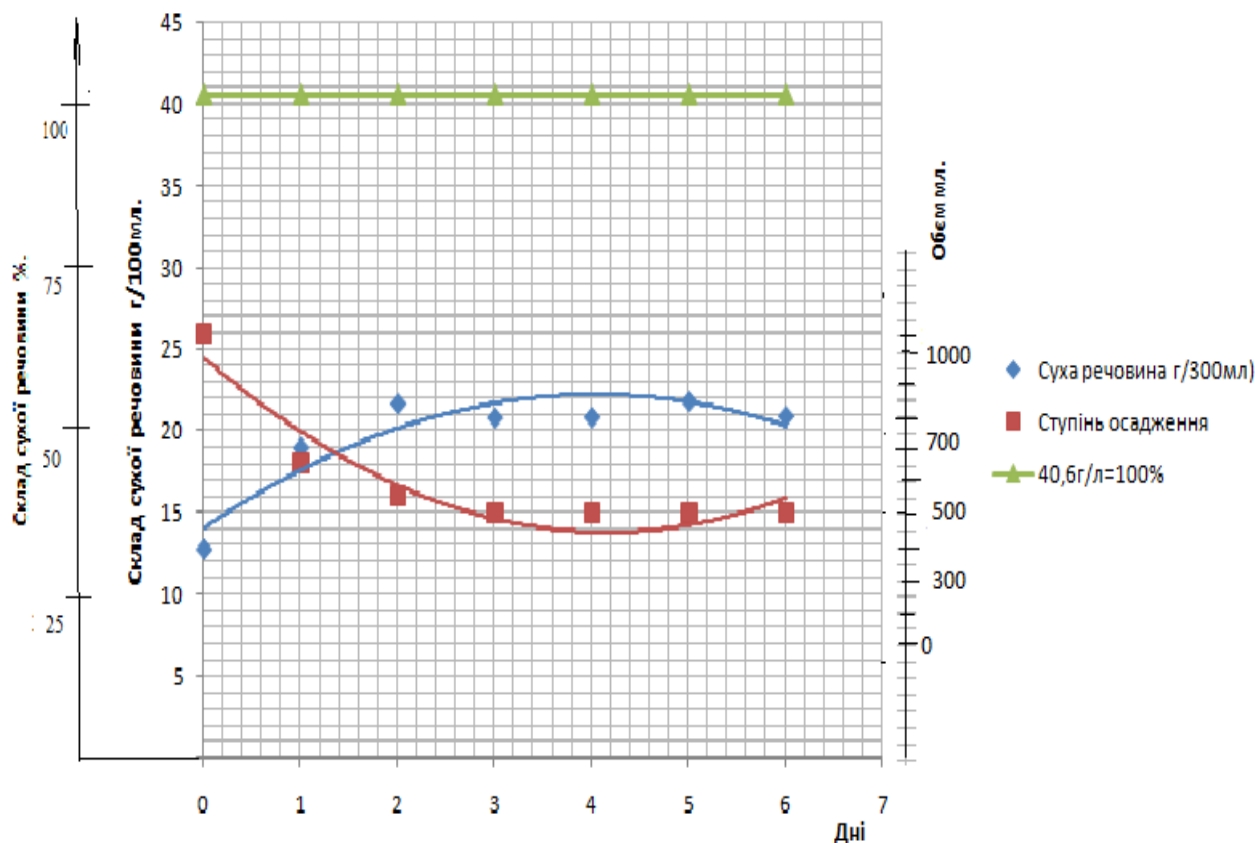


Рис. 7 Залежність швидкості осадження зброженої біомаси від часу відстоювання

Висновки

1. Для коректнішої оцінки енергетичної ефективності роботи анаеробного реактора, представляється бажаним розглядати всі чинники по масових характеристиках.
2. На підставі виконаних досліджень можна зробити висновок, що після збродження більше 50 % сухої речовини рідкої біомаси протягом 3-х днів випадає в осад. Запах рідкої біомаси знижується після збродження, і це пояснюється швидким розкладанням у першу чергу біологічно нестабільних з'єднань (вуглеці, білки і т.д.). Зниження запаху залежить від часу бродіння; зі збільшенням часу бродіння поріг запаху знижується.

Список літератури

1. Куріс Ю. В. Підвищення теплотехнічних та технологічних показників спалювання біогазу в теплогенеруючому обладнанні: Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук, НУХТ, Київ, 2007.
2. Сельскохозяйственная биотехнология: Учеб/ В. С. Шевелуха, Е. А. Калашникова, Е. С. Воронин и др., Под редак. В. С. Шевелухи - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2003. – 469 с. ил.
3. Скороходов А. Н. Общая методика моделирования технологий и технических средств для их реализации по критериям энерго- и ресурсосбережения. // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. № 4, 2005. – С. 56–61.
4. Куріс Ю. В., Ткаченко С. И. Описание расчета потерь теплоты биогазовой установки // Фаховий журнал “Енергетика и елек Куріс Ю. В., Степанов Д. В., Ткаченко С. И., Хажмурадов М. А., Карнацевич Л. В. Увеличение эффективности дальнейшего использования и сжигания биогаза: «Достижения и перспективы». // Фаховий журнал “Енергетика и электрификация”. г. Киев, – № 12. – 2006. – С. 67–79.
5. Мартынюк А. А. Техническая устойчивость в динамике. Киев: Техника, 1973. 188 с.

«Электрификация». г. Киев, - №9. – 2008. – С. 51-55.

6. Курис Ю. В., Крючков Е. Н. Анализ энергетического баланса производственно - животноводческого комплекса ЗАО “Запорожсталь” с использованием биоэнергетической установки // Сборник конференции «Биотехнология: Образование, наука», – НТУ КПИ. – 2003. – С. 141–143.

7. Курис Ю. В., Крючков Е. Н., Шинкаренко Л. М. Экономические и экологические области использования методов биотехнологий в окружающей среде. // Сборник конференции “Понт Эвксинский III”, – г. Севастополь, – № 1. – 2003. – С. 27–30.

8. Курис Ю. В. Преимущества биотехнологий в решение энергетических вопросов. // Труды юбилейной XXX международной научно технической конференции “Запорожсталь XXX”. – Запорожье: Запорожсталь. – 2003. – С. 53–57.

9. Курис Ю. В., Майстренко А. Ю., Ткаченко С. И. Систематизация схем биогазовых установок и оптимизация энергетической эффективности работы анаэробного реактора // Фаховий журнал “Энергетика и электрификация”. г. Киев, – № 8. – 2008. – С. 31–39.

10. Курис Ю. В., Ткаченко С. И. Анализ эффективности мирового энергетического и экологического использования биомассы // Фаховий журнал “Промышленная электроэнергетика”. г. Киев, – №5. – 2008. – С. 35–41.

RESEARCH OF INDEXES BIOREACTOR AT ANAEROBIC FERMENTATION OF BIOMASSY

O. Ju. MAJSTRENKO, D-r Sci. Tech., Ju. V. KURIS, Cand. Tech. Sci.
Ju. S. KALINZEVA, The Master , V. M. VLASENKO, senior teacher

The problem of utilization of wastes of industrial stock-raising is actual in connection with the high concentration of animals on the limited area. Pig breedings enterprises, consuming the known traditional power mediums, possess large enough not in the use power potential which pork manure is. In the article authors are consider basic methods and methods of processing of stock-raising.

Поступила в редакцию 21.12 2009