

УДК 662.767.2

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА БІОГАЗОВА УСТАНОВКА З ВЕРТИКАЛЬНИМ  
ЛОПАТЕВИМ ПЕРЕМІШУВАЧЕМ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ  
ЇЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ**

Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна

*В статті запропоновано схему експериментальної біогазової установки для дослідження енергоефективності використання перемішувального пристрою субстрату та термостабілізації процесу біоконверсії. Авторами розроблено методику експериментальних досліджень впливу конструктивно-технологічних параметрів біогазової установки з лопатевим перемішуванням органічної маси для підтвердження адекватності теоретичних обґрунтувань шляхів підвищення енергоефективності роботи біогазових установок.*

*В статье предложена схема экспериментальной биогазовой установки для исследования энергоэффективности использования перемешивающего устройства субстрата и термостабилизации процесса биоконверсии. Авторами разработана методика экспериментальных исследований влияния конструктивно-технологических параметров биогазовой установки с лопастным перемешиванием органической массы для подтверждения адекватности теоретических обоснований путей повышения энергоэффективности работы биогазовых установок.*

*In the article the chart of experimental biogas fluidizer is offered research of energy efficiency of the use of mix will build on to substrate and thermostabilization of process of bioconversion. Authors are develop the method of experimental researches of influence structurally technological parameters of the biogas setting with blade interfusion of organic mass for confirmation of adequacy of theoretical grounds of ways of increase of energy efficiency of work of the biogas settings.*

**Вступ**

Анаеробне перероблення органічних відходів дозволяє отримати альтернативне відновлювальне джерело енергії – біогаз та зменшити техногенне навантаження на біосферу [1]. Показником ефективної роботи установок з анаеробної утилізації органічних відходів є продуктивність, вихід біогазу з одиниці об'єму біомаси, тривалість робочого циклу та енергетичні затрати із забезпечення інтенсифікації та термостабілізації біоконверсії [1-3]. Підвищення енергоефективності технологічного процесу виробництва біогазу можна досягти шляхом вдосконалення устаткування, що забезпечує оптимальні параметри підігрівання та перемішування органічного субстрату в установці [4].

Метою роботи є розроблення експериментальної біогазової установки з вертикальним лопатевим перемішувачем субстрату та методики досліджень впливу її конструктивно-технологічних параметрів для підтвердження адекватності теоретичних обґрунтувань шляхів підвищення енергоефективності роботи біогазових установок, що запропоновані в роботах [5, 6].

**Постановка задачі дослідження**

Для підтвердження основних теоретичних положень та висновків, що отримано за результатами обґрунтування напрямків підвищення енергоефективності біогазових установок шляхом термостабілізації анаеробного бродіння при перемішуванні субстрату та моделювання процесів інтенсифікації ферментації органічної біомаси при утилізації сільськогосподарських відходів, необхідно виконати такі експериментальні дослідження за програмою:

- визначення фізичних показників робочого середовища: вміст сухих речовин в біомасі; густина та в'язкість субстрату; розміри твердих частинок;
- обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів експериментальної біогазової установки;
- розроблення експериментальної біогазової установки з вертикальним лопатевим перемішувачем, теплообмінним та енергоощадним корпусом;

- розроблення комп'ютерної програми управління робочими параметрами експериментальної біогазової установки;
  - визначення енергетичних витрат на термостабілізацію анаеробного бродіння субстрату в біогазовій установці;
  - дослідження розподілу температур по об'єму біогазової установки при перемішуванні субстрату вертикальною пропелерною мішалкою;
  - визначення впливу частоти обертання вала вертикальної пропелерної мішалки та тепловіддачі від теплообмінника на інтенсивність анаеробного бродіння та продуктивність анаеробного бродіння;
  - встановлення залежності потужності лопатевого перемішувального пристрою в процесі ферментації органічної маси від частоти обертання вала вертикальної пропелерної мішалки.
- Інтервали варіювання основних технологічних параметрів дослідження енерго-ефективності експериментальної біогазової установки наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Інтервали варіювання основних параметрів дослідження**

Параметр	Позначення	Одиниці	Межі варіювання
Питомий тепловий потік	q	Вт/м <sup>2</sup>	500...60000
Температура субстрату в об'ємі установки	T <sub>c</sub>	°C	20...40
Температура зовнішнього середовища	T <sub>зовн</sub>	°C	10...30
Частота обертання перемішувача	ω	хв <sup>-1</sup>	1...10
Вологість субстрату	W	%	85...95
Густина субстрату	ρ <sub>c</sub>	кг/м <sup>3</sup>	1010...1030
В'язкість субстрату	μ <sub>c</sub>	Па·с	0,3...3,0
Діаметр твердих частинок субстрату	d <sub>ч</sub>	м	0,005...0,05

Виходячи з 95 % рівня надійності дослідів, як найбільш розповсюдженого при технічних дослідженнях [7, 8], при виконанні експериментальних досліджень енергоефективності біогазової установки з вертикальною пропелерною мішалкою, доцільно обмежитись трикратною повторюваністю.

**Основна частина**

Витрати енергії на термостабілізацію та перемішування субстрату в біогазовій установці з метою створення оптимальних умов анаеробного бродіння визначаються як

$$E = (E_{ПС} + E_{\Delta B}) \rightarrow \min, \tag{1}$$

де  $E_{ПС}$  – витрати енергії на підігрівання субстрату для забезпечення відповідного режиму ферментації;

$E_{\Delta B}$  – витрати енергії на перемішування субстрату для створення однорідного за фізичними властивостями середовищем в об'ємі установки, які визначаються за формулою

$$E_{ПС} = N_{\text{дв}} \cdot \tau_1, \tag{2}$$

де  $N_{\text{дв}}$  – потужність двигуна привода вала перемішувача;

$\tau_1$  – час, затрачений на перемішування субстрату в біогазовій установці.

Витрати енергії на підігрівання субстрату рівні

$$E_{\Delta B} = W \cdot c \cdot \tau_2 \cdot (\Delta T), \tag{3}$$

де  $W$  – об'єм субстрату в біогазовій установці;

$c$  – зведена питома масова теплоємність субстрату;

$\tau_2$  – час, що витрачається на нагрівання субстрату в біогазовій установці.

$\Delta T$  – різниця температур між субстратом в біогазовій установці та навколишнім середовищем;

Для перевірки достовірності результатів теоретичних досліджень та визначення раціональних конструктивних параметрів технологічного обладнання для отримання біогазу

внаслідок анаеробного бродіння запропоновано конструктивну схему експериментальної лабораторної біогазової установки (рис. 1).

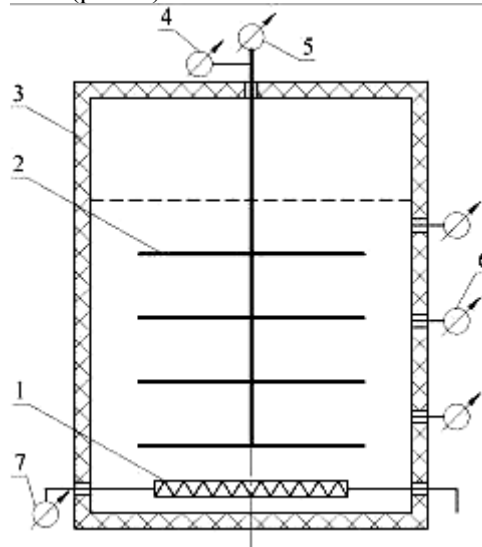


Рис. 1. Принципова схема експериментальної біогазової установки для дослідження енергоефективності перемішування субстрату та термостабілізації анаеробного процесу бродіння: 1 – нагрівальний пристрій; 2 – лопатевий перемішувач; 3 – теплоізований корпус; 4 – частотомір; 5 – лічильник спожитої електроенергії на обертання перемішувача; 6 – сенсори температури; 7 – лічильник спожитої електроенергії на нагрівання

Біогазова установка із вертикальним перемішуванням (рис. 1) є ефективною внаслідок того, що покращення процесу анаеробного бродіння відбувається за рахунок введення лопатевого перемішувального пристрою, а також нагрівача біомаси. Біогазова установка складається із теплоізовального корпусу 3 для зменшення тепловтрат із установки через її огорожуючі конструкції. Таким чином, завдяки теплоізоляції досягається ефект енергоефективності. Лопатевий перемішувач 2 та нагрівальний пристрій 1 оснащені лічильниками спожитої електроенергії на нагрівання 7 та лічильником спожитої електроенергії на обертання 5. Лопатевий перемішувач 2 являє собою вал, на якому розміщено лопаті для перемішування субстрату всередині установки.

Лопатевий перемішувач є досить простим та часто вживаним в процесах біоконверсії, оскільки створює помірно інтенсивну радіально-осьову циркуляцію. Лопаті перемішувача нахилені під кутом, оскільки таким чином створюється переміщення субстрату вгору, а отже досягається ефект не лише руху біомаси до стінок біогазової установки, а суцільне переміщення субстрату по всьому об'єму установки. Нагрівальний пристрій вмонтовано внизу біогазової установки. Внаслідок постійного перемішування біомаса, нагріваючись знизу до температури відповідного анаеробного процесу (кріофільного, мезофільного, термофільного), переміщується вгору для рівномірного прогріву по всьому об'єму установки.

За показниками частотоміра 4, лічильника спожитої електроенергії на обертання 5, сенсорів температури 6 та лічильника спожитої електроенергії на нагрівання 7 виконуються вимірювання частоти обертання лопатевого перемішувача, витрат енергії на термостабілізацію та інтенсифікацію процесу анаеробного бродіння, а також розподіл температурних полів органічного субстрату всередині корпусу установки.

Енергоефективність біогазової установки з вертикальним лопатевим перемішуванням субстрату [9] може бути підвищена за рахунок зменшення потужності двигуна привода вала перемішувача, яка визначається за формулою [10]

$$N_{\text{дв}} = \frac{N_{\text{л}} \cdot k_3}{\eta_{\text{пр}}} \rightarrow \min, \quad (4)$$

де  $N_{\text{л}}$  – потужність лопатевого перемішувального пристрою, що витрачається на перемішування субстрату в біогазовій установці, Вт;

$k_3$  – коефіцієнт запасу потужності;

$\eta_{np}$  – загальний ККД привода.

Потужність, яка затрачується лопатевим вертикальним перемішувачем, залежить від в'язкості  $\mu_c$  і густини  $\rho_c$  субстрату, частоти обертання перемішувального пристрою  $n$ , діаметра лопаті перемішувача  $d_m$ , а також діаметра корпусу біогазової установки  $D$

$$N_{II} = f(\mu_c, \rho_c, g, n, d_m, D). \quad (5)$$

Затрати енергії на перемішування визначаються потужністю перемішувача та їх можна визначити з рівняння [11]

$$\frac{N_{II}}{\rho^n d_m^5} = C \left( \frac{D}{d_m} \right)^a \left( \frac{H_0}{d_m} \right)^b \left( \frac{h_m}{d_m} \right)^c \left( \frac{l}{d_m} \right)^f \left( \frac{b}{d_m} \right)^j \left( \frac{\rho_c n d_m^2}{\mu} \right)^m \left( \frac{n^2 d_m}{g} \right)^n \left( \frac{z_n}{z_{cm}} \right)^p, \quad (6)$$

де  $N_{II}$  – потужність лопатевого перемішувача, Вт;

$\rho_c$  – густина субстрату, кг/м<sup>3</sup>;

$n$  – частота обертання перемішувального пристрою, с<sup>-1</sup>;

$d_m$  – діаметр перемішувача, м;

$D$  – внутрішній діаметр біогазової установки, м;

$H_0$  – висота шару субстрату, м;

$h_m$  – висота розташування перемішувача над дном, м;

$l$  – довжина лопаті перемішувача, м;

$b$  – ширина лопаті, м;

$z_n$  – кількість лопатей перемішувача на валу;

$z_{cm}$  – еталонна кількість лопатей перемішувача.

Показники степеня  $a, b, c, f, j, m, n, p$  та коефіцієнт рівняння  $C$  для окремих типів перемішувачів визначаються на фізичних моделях експериментально.

Інтенсивність тепловіддачі від нагрівального елемента біогазової установки в залежності від його теплофізичних властивостей характеризується критерієм Нуссельта [12]

$$Nu = A_1 \cdot (Gr_p \cdot Pr_p)^{n_1} \cdot (Pr_p / Pr_c)^{m_1}, \quad (7)$$

де  $Gr_p$  – критерій Грасгофа;

$Pr_c$  – критерій Прандтля для субстрату.

Вплив швидкості обертання вертикального лопатевого перемішувача на інтенсифікацію теплообміну за рахунок вимушеної конвекції визначається залежністю [12]

$$Nu_2 = A_2 \cdot Re_{\omega}^{n_2} \cdot Pr^{m_2}, \quad (8)$$

де  $Re_{\omega}^n$  – обертовий критерій Рейнольдса;

$A_i, m_i, n_i$  – коефіцієнти, які визначаються за результатами статистичного аналізу експериментальних даних;

Вміст сухої речовини субстрату визначено об'ємно-ваговим способом з випаровуванням рідкої фази в термічній шафі. Вологість субстрату визначалась згідно із формулою

$$W = \frac{m_w - m_c}{m_c} \cdot 100\%, \quad (9)$$

де  $m_w$  – маса вологого зразка субстрату, кг;

$m_c$  – маса зразка субстрату після випаровування рідкої фази в термічній шафі, кг.

В результаті проведення експериментальних лабораторних досліджень на трьох зразках коров'ячої свіжої гноївки було визначено, що її вологість сягає 65...70 %.

Для підтвердження результатів теоретичних досліджень [13] розроблено лабораторну експериментальну установку з лопатевим вертикальним перемішуванням субстрату та електричною системою підігрівання (рис. 2).



Рис. 2. Експериментальна лабораторна установка для проведення досліджень

Серед методів планування експерименту найпоширенішим є метод повного факторного експерименту. План даного експерименту містить усі можливі комбінації всіх факторів, що впливають на вихід біогазу при анаеробному переробленні органічних відходів. В даному випадку розглядається планування повного факторного експерименту, при якому досліджується вплив на результат досліду, тобто вихід біогазу, трьох факторів:  $x$  – температура субстрату в біогазовому реакторі;  $y$  – частота обертання перемішувального пристрою;  $z$  – термічний опір стінок реактора.

Для виконання повного факторного експерименту його план побудовано у вигляді латинського квадрата. В цьому випадку в кожному досліді вказується необхідне поєднання рівнів всіх факторів. Кожен фактор враховується на трьох різних рівнях ( $x_1, x_2, x_3; y_1, y_2, y_3; z_1, z_2, z_3$ ):

- 1)  $x = [30...50]$ , °C:  $x_1 = 20$  °C,  $x_2 = 30$  °C,  $x_3 = 40$  °C.
- 2)  $y = [1...10]$ , об/хв:  $y_1 = 1$  об/хв,  $y_2 = 5$  об/хв,  $y_3 = 10$  об/хв.
- 3)  $z = [85...95]$ , м<sup>2</sup>·°C/Вт:  $z_1 = 85$  %,  $z_2 = 90$  %,  $z_3 = 95$  %.

Для даного випадку латинський квадрат планування повного факторного експерименту з визначення виходу біогазу, як залежність від температури субстрату в біогазовому реакторі, частоти обертання перемішувального пристрою, термічного опору стінок реактора наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Латинський квадрат планування повного факторного експерименту

$T, ^\circ\text{C}$ \ $n$	$y_1 = 1$ об/хв	$y_2 = 5$ об/хв	$y_3 = 10$ об/хв
$x_3 = 40$ °C	$z_1 = 85$ %	$z_2 = 90$ %	$z_3 = 95$ %
$x_2 = 30$ °C	$z_2 = 90$ %	$z_3 = 95$ %	$z_1 = 85$ %
$x_1 = 20$ °C	$z_3 = 95$ %	$z_1 = 85$ %	$z_2 = 90$ %

Відшукувана функція залежить одразу від кількох факторів. Перерахування результатів експерименту дає змогу знайти її залежність від кожного фактора, зокрема від того, який цікавить найбільше

$$F = f_1(x) + f_2(y) + f_3(z). \quad (9)$$

де  $x, y, z$  – фактори експерименту, від яких залежить продуктивність біогазової установки.

### Висновки

Запропоновано принципову схему експериментальної біогазової установки для дослідження енергоефективності перемішування субстрату та термостабілізації процесу бродіння, що дозволить перевірити достовірність результатів теоретичних досліджень.

Розглянуто методику експериментальних досліджень впливу конструктивно-технологічних параметрів біогазової установки з вертикальним лопатевим перемішувачем на енергоефективність анаеробного бродіння субстрату.

### Список літератури

1. Ратушняк Г. С. Енергозберігаючі відновлювальні джерела тепlopостачання: [навч. посібник] / Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула, К. В. Анохіна. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 170 с.
2. Ткаченко С. Й. Теплообмінні та гідродинамічні процеси в елементах енергозабезпечення біогазової установки / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 132 с.
3. Баадер Б. Биогаз: теория и практика / Б. Баадер, Е. Доне, М. Бренндерфер; [пер. з нім. М. И. Серебряного.] – М. : Колос, 1982. – 148 с.
4. Ратушняк Г. С. Інтенсифікація біоконверсії коливальним перемішуванням субстрату. Монографія / Г.С. Ратушняк, В.В. Джеджула. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2008. – 117 с.
5. Ратушняк Г. С. Моделювання теплового режиму на початковій фазі бродіння в біогазовій установці з пропелерною мішалкою / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Вісник ХНУ. – 2010. – № 4. – С. 19-22.
6. Ратушняк Г. С. Дослідження параметрів процесу перемішування органічної маси в біогазовій установці з вертикальним пропелерним перемішувачем / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна, В. В. Джеджула // Збірник наукових праць ВНАУ. – 2010. – № 5. – С. 139-144.
7. Веденяпин В. Г. Общая методика экспериментального исследования и обработка опытных данных / В. Г. Веденяпин. – М. : Колос, 1973. – 199 с.
8. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена / В. А. Осипова. – М. : Энергия, 1979. – 320 с.
9. Пат. 36453 Україна, МПК С 02 F 11/04. Біогазова установка / Ратушняк Г.С., Анохіна К.В.; Державний департамент інтелектуальної власності. – № u200806844; Заявл. 19.05.2008; опубл. 27.10.2008. Бюл. № 20.
10. Машины и аппараты пищевых производств. Кн. 1: Учеб. для вузов / [С.Т. Антипов, И.Т. Кретон, А.Н. Остриков и др.]; Под. ред. В.А. Панфилова. – М. : Высшая школа, 2001.
11. Жерновая И. М. Процессы перемешивания в жидких средах / И. М. Жерновая, В. В. Копиров // Процессы и аппараты хим. технологии (Итоги науки и техники). – М. : ВИНТИ, 1975. – т. 3. – С. 5-99.
12. Исаченко В. П. и др. Теплопередача. Учебник для вузов. Изд.–е 3–е перераб. и доп. / В. П. Исаченко и др. – М. : Энергия. – 1975. – 488 с.
13. Ратушняк Г. С. Моделювання з використанням лінгвістичних змінних процесу біоконверсії перемішуванням субстрату / Г. С. Ратушняк, К. В. Анохіна // Вібрації в техніці та технологіях. – 2010. – № 4 (60). – С. 130-137.

**Ратушняк Георгій Сергійович** – к.т.н., проф., завідувач кафедри теплогазопостачання Вінницького національного технічного університету

**Анохіна Катерина Володимирівна** – аспірант Вінницького національного технічного університету.