

УДК 536.24:628.477

Г. С. Ратушняк, к. т. н., проф.;

В. В. Джеджула, асп.

АВТОМАТИЧНЕ УПРАВЛІННЯ В СИСТЕМАХ БІОКОНВЕРСІЇ

Розглянуто основні фактори впливу на вихід біогазу при анаеробному бродінні в біореакторах. Наведено дерево логічного висновку, результати експериментальних досліджень та рекомендації щодо автоматичного керування реактором.

Початкові передумови та постановка задачі дослідження

Автоматичному керуванню технологічними процесами біогазових реакторів в системах біоконверсії та прогнозуванню продуктивності роботи біореакторів сприяє моделювання багатофакторного процесу на базі даних, що реєструються як вихідні показники. Прогнозування ефекту виходу біогазу в залежності від факторів, що впливають на цей процес, доцільно виконувати на основі експертних кількісних і якісних оцінок. Чинниками, що інтенсифікують вихід біогазу є: барботування, оребрення та вібрація нагрівального елемента в субстраті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У вітчизняній технічній літературі окремі питання автоматичного керування та прогнозування продуктивності біогазових реакторів уже висвітлені. Основна увага в останніх дослідженнях приділяється впливу властивостей субстрату, форм реактора, бульбашок біогазу, оребрення теплообмінника на протікання процесу тепловіддачі [1—3].

Невирішена раніше частина загальної проблеми

В науковій літературі фрагментарно розкрито вплив вібраційних процесів на теплообмін, якості і тип вхідної сировини, не зроблено комплексне порівняння інтенсифікуючих процесів.

Метою статті є створення експертно-моделювальної системи для багатофакторного аналізу параметрів, що сприяють активації виробництва біогазу. Для досягнення поставленої мети використаний математичний апарат, що базується на теорії нечіткої логіки [4—6]. Цей метод, як взаємозв'язана сукупність математичних моделей, алгоритмів й формалізованих методик, дозволяє використовувати експертно-лінгвістичну інформацію для прогнозування продуктивності реактора від факторів, що її обумовлюють, а також від факторів, що впливають на процес теплообміну між нагрівником і субстратом.

Результати дослідження

Для встановлення ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на вихід біогазу в біореакторах, виконана їх класифікація за ознаками: тип і якість сировини, конструкція реактора, стабільність температурного режиму. Розглядаючи вихід біогазу на системному рівні, лінгвістичну змінну $A_{\text{вих}}$, що характеризує вихід біогазу, можна представити у вигляді співвідношення

$$A_{\text{інт}} = f(X, Y, Z), \quad (1)$$

де X — лінгвістична змінна (ЛЗ), що описує вплив типу і якості сировини; Y — ЛЗ, що описує вплив конструкції реактора; Z — ЛЗ, що описує вплив стабільності температурного режиму.

ЛЗ, що описує вплив типу і якості сировини, може бути представлена виразом

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

де x_1 — ЛЗ «тип сировини»; x_2 — ЛЗ «подрібненість сировини»; x_3 — ЛЗ «вологість сировини».

Лінгвістичну змінну, що описує вплив конструкції реактора, можна розгорнути в співвідношенні

$$Y = f(y_1, y_2, y_3), \tag{3}$$

де y_1 — ЛЗ «звичайний»; y_2 — ЛЗ «утеплений»; y_3 — ЛЗ «з інтенсифікацією теплообміну та контролем параметрів».

Лінгвістичну змінну, що описує вплив стабільності температурного режиму, можна розгорнути в співвідношенні

$$Z = f(z_1, z_2, z_3), \tag{4}$$

де z_1 — ЛЗ «градієнт температур між нагрівником та середовищем»; z_2 — ЛЗ «інтенсифікація теплообміну»; z_3 — ЛЗ «тип теплообмінника».

В рівняння (4) входять змінні, які в свою чергу залежать від інших факторів

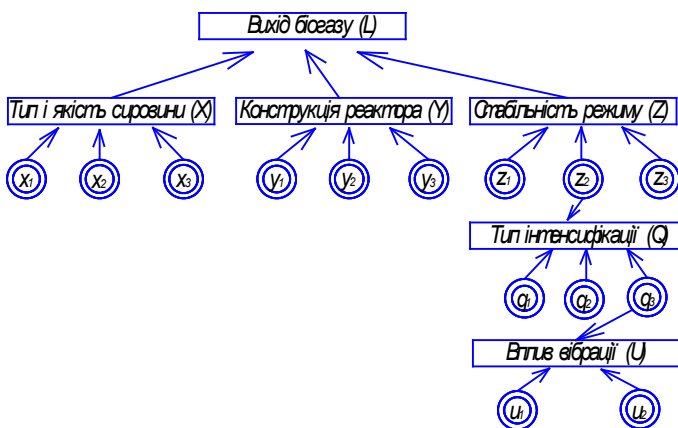
$$z_2 = f(q_1, q_2, q_3), \tag{5}$$

де q_1 — оребрення теплообмінника, q_2 — барботування, q_3 — віброактивація.

$$q_3 = f(u_1, u_2), \tag{6}$$

де u_1 — частота вібрацій, u_2 — амплітуда вібрацій.

За результатами аналізу сукупності співвідношень (1)...(6) побудовано дерево логічного висновку. Корінь дерева логічного висновку відповідає величині ефекту виходу біогазу, а висячі вершини — факторам, що впливають на його величину (рис. 1).



Оцінка значень лінгвістичних змінних, які наведені в співвідношенні (1), проводиться за допомогою системи якісних термінів: Н — низька; нС — нижче середнього; С — середня; вС — вище середнього; В — висока. Кожний з цих термінів становить відповідну нечітку множину, тобто деяку властивість, яка розглядається як лінгвістичний терм. Для лінгвістичних змінних оціночні терми наведено в табл. 1.

Рис 1. Дерево логічного висновку

Таблиця 1

Фактори як лінгвістичні змінні

Позначення й назва змінної	Універсальна множина	Терми для оцінки
x_1 — тип сировини	(1...2), у. о.	Корови (к), свині(св), солома (сл)
x_2 — подрібненість	(0,01...1), мм	здрібнено (зд), нездрібнено (нз)
x_3 — вологість сировини	(80...98), %	низька (н), нормальна (нр), висока (в)
y_1 — звичайний тип реактора	(1,0...2), м ² ·°C/Вт	низька (н), помірна (п), висока (в)
y_2 — утеплений тип реактора	(2,0...3,0), м ² ·°C/Вт	низька (н), помірна (п), висока (в)
y_3 — з інтенсифікацією та контролем параметрів	(1...3) у. о.	інтенсифікація бродіння (ін), контроль температур (кт), контроль основних параметрів (к)
z_1 — градієнт температур	(0...30) Δt, °C	низький (н), задовільний (з), високий (в)
z_2 — інтенсифікація теплообміну	$K = Nu/Nu_0 = (1,5...25)$	низька (н), середня (ср), висока (в)
z_3 — тип теплообмінника	(1...2) у. о.	трубчастий (тр), вмонтований (вм)
q_1 — оребрення	(1...30), мм.	відсутнє(в), середнє (с), високе (вс)
q_2 — барботування	$V_{прив} (0...40) 10^{-4}$, м ³ /м ² ·с	відсутнє (в), середнє (с), високе (вс)
q_3 — віброактивація	$K = Nu/Nu_0 = 3...25$	відсутнє (в), середнє (с), високе (в)
u_1 — частота коливань	(0...100), Гц	низька (н), середня (с), висока (в)
u_2 — амплітуда коливань	(0...20), мм	низька (н), середня (с), висока (в)

У табл. 1 використано такі позначення: u, o — умовні одиниці, Δt — різниця температур між температурою стінки і температурою субстрату, $K = Nu/Nu_0$ — відношення критерію Нусельта при активації теплообміну і при вільній конвекції, $V_{прив}$ — приведена швидкість барботування.

Для розроблення математичної моделі оцінювання ступеня виходу біогазу в біореакторах та прийняття організаційно-технологічних рішень щодо зменшення капітальних та експлуатаційних затрат в системах біоконверсії, як джерело інформації використовуються експертні оцінки, які мають якісний характер і доступні проектувальникам даних систем [3, 4]. Метод побудови функцій належності передбачає фазифікацію нечітких оцінок факторів впливу. Етап фазифікації включає вибір нечітких термів для лінгвістичної оцінки факторів впливу, що задані на відповідних універсальних множинах (табл. 2).

Нечітка множина, за допомогою якої формалізується терм \tilde{S} , є сукупністю пар

$$\tilde{S} = \left\{ \frac{\mu_s(u_1)}{u_1}, \frac{\mu_s(u_2)}{u_2}, \dots, \frac{\mu_s(u_n)}{u_n} \right\}, \tag{7}$$

де $\{u_1, u_2, \dots, u_n\} = U$ — універсальна множина, на якій задається нечітка множина $S \in U$; $\mu_s(u_i)$ — ступінь належності елемента $u_i \in U$ до нечіткої множини \tilde{S} .

Розв'язання задачі ґрунтується на ідеї розподілу ступенів належності універсальної множини згідно з їхніми рангами.

Таблиця 2

База знань про співвідношення (1)

№	ЯКЦО			ТО
	Вплив типу і якості сировини (X)	Вплив конструкції реактора (Y)	Вплив стабільності режиму (Z)	Вихід біогазу ($A_{вих}$)
1	Відсутній (Вд)	Відсутній (Вд)	Відсутній (Вд)	Низький (Н)
2	Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	
3	Відсутній (Вд)	Відсутній (Вд)	Відсутній (Вд)	Нижче середнього (нС)
4	Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	
5	Середні (С)	Середні (С)	Середні (С)	
6	Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	Нижче середніх (нС)	Середній (С)
7	Середні (С)	Середні (С)	Середні (С)	
8	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Вище середнього (вС)
9	Середні (С)	Середні (С)	Середні (С)	
10	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	
11	Високі (В)	Високі (В)	Високі (В)	Високий (В)
12	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	
13	Високі (В)	Високі (В)	Високі (В)	

Лінгвістичним висловлюванням, що наведені в табл. 2, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних по відповідному терму

$$\mu_n(A_{вих}) = \mu_{вд}(X) \wedge \mu_{вд}(Y) \wedge \mu_{вд}(Z) \vee \mu_{нС}(X) \wedge \mu_{нС}(Y) \wedge \mu_{нС}(Z); \tag{8}$$

$$\mu_{нС}(A_{вих}) = \mu_{вд}(X) \wedge \mu_{вд}(Y) \wedge \mu_{вд}(Z) \vee \mu_{нС}(X) \wedge \mu_{нС}(Y) \wedge \mu_{нС}(Z) \vee \mu_{С}(X) \wedge \mu_{С}(Y) \wedge \mu_{С}(Z); \tag{9}$$

$$\mu_{С}(A_{вих}) = \mu_{нС}(X) \wedge \mu_{нС}(Y) \wedge \mu_{нС}(Z) \vee \mu_{С}(X) \wedge \mu_{С}(Y) \wedge \mu_{С}(Z) \vee \mu_{вС}(X) \wedge \mu_{вС}(Y) \wedge \mu_{вС}(Z); \tag{10}$$

$$\mu_{вС}(A_{інт}) = \mu_{С}(X) \wedge \mu_{С}(Y) \wedge \mu_{С}(Z) \vee \mu_{вС}(X) \wedge \mu_{вС}(Y) \wedge \mu_{вС}(Z) \vee \mu_{В}(X) \wedge \mu_{В}(Y) \wedge \mu_{В}(Z); \tag{11}$$

$$\mu_{В}(A_{інт}) = \mu_{вС}(X) \wedge \mu_{вС}(Y) \wedge \mu_{вС}(Z) \vee \mu_{В}(X) \wedge \mu_{В}(Y) \wedge \mu_{В}(Z). \tag{12}$$

Оцінку рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язує вплив типу і якості сировини (X) на вихід біогазу з типом сировини (x_1), подрібненістю (x_2), вологістю (x_3), наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

База знань про співвідношення (2)

№	ЯКЩО			ТО
	Тип сировини (x_1)	Подрібненість (x_2)	Вологість (x_3)	Якість сировини (X)
1	Субстрат корів (к)	Нездрібнено (нз)	Висока (в)	Низька (Н)
2	Субстрат корів (к)	Нездрібнено (нз)	Нормальна (н)	
3	Субстрат корів (к)	Здрібнено (зд)	Висока (в)	Нижче середньої (нС)
4	Субстрат свиней (св)	Нездрібнено (нз)	Нормальна (н)	
5	Субстрат корів (к)	Нездрібнено (нз)	Низька (н)	
6	Субстрат корів (к)	Здрібнено (зд)	Нормальна (н)	Середня (С)
7	Субстрат свиней (св)	Здрібнено (зд)	Висока (в)	
8	Солома (с)	Нездрібнено (нз)	Нормальна (н)	
9	Субстрат корів (к)	Здрібнено (зд)	Низька (н)	Вище середнього (вС)
10	Субстрат свиней (св)	Здрібнено (зд)	Нормальна (н)	
11	Солома (с)	Здрібнено (зд)	Нормальна (н)	
12	Субстрат свиней (св)	Здрібнено (зд)	Низька (н)	Висока (В)
13	Солома (с)	Здрібнено (зд)	Низька (н)	

Лінгвістичним висловлюванням, що наведено в табл. 3, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом

$$\mu_n(X) = \mu_k(x_1) \wedge \mu_{nz}(x_2) \wedge \mu_v(x_3) \vee \mu_k(x_1) \wedge \mu_{nz}(x_2) \wedge \mu_n(x_3); \quad (13)$$

$$\mu_{nC}(X) = \mu_k(x_1) \wedge \mu_{зд}(x_2) \wedge \mu_v(x_3) \vee \mu_{св}(x_1) \wedge \mu_{nz}(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_k(x_1) \wedge \mu_{nz}(x_2) \wedge \mu_n(x_3); \quad (14)$$

$$\mu_C(X) = \mu_k(x_1) \wedge \mu_{зд}(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_{св}(x_1) \wedge \mu_{зд}(x_2) \wedge \mu_v(x_3) \vee \mu_c(x_1) \wedge \mu_{nz}(x_2) \wedge \mu_n(x_3); \quad (15)$$

$$\mu_{вС}(X) = \mu_k(x_1) \wedge \mu_{зд}(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_{св}(x_1) \wedge \mu_{зд}(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_c(x_1) \wedge \mu_{зд}(x_2) \wedge \mu_n(x_3); \quad (16)$$

$$\mu_V(X) = \mu_{св}(x_1) \wedge \mu_{зд}(x_2) \wedge \mu_n(x_3) \vee \mu_c(x_1) \wedge \mu_{зд}(x_2) \wedge \mu_n(x_3). \quad (17)$$

Таким чином розробляються лінгвістичні висловлювання і відповідні системи нечітких логічних рівнянь для кожної змінної на всіх рівнях (рівняння 3, 4).

Таблиця 4

База знань про співвідношення (4)

№	ЯКЩО			ТО
	Гradient температур (z_1)	Інтенсифікація теплообміну (z_2)	Тип теплообмінника (z_3)	Стабільність режиму (Z)
1	Високий (в)	Низька (н)	Трубчатий (тр)	Низька (Н)
2	Високий (в)	Низька (н)	Вмонтований (вм)	
3	Високий (в)	Середня (ср)	Трубчатий (тр)	Нижче середньої (нС)
4	Задовільний (з)	Низька (н)	Трубчатий (тр)	
5	Задовільний (з)	Середня (ср)	Трубчатий (тр)	
6	Задовільний (з)	Середня (ср)	Вмонтований (вм)	Середня (С)
7	Низький (н)	Середня (ср)	Трубчатий (тр)	
8	Задовільний (з)	Висока (в)	Трубчатий (тр)	
9	Задовільний (з)	Середня (ср)	Вмонтований (вм)	Вище середнього (вС)
10	Задовільний (з)	Висока (в)	Вмонтований (вм)	
11	Низький (н)	Середня (ср)	Вмонтований (вм)	
12	Низький (н)	Висока (в)	Трубчатий (тр)	Висока (В)
13	Низький (н)	Висока (в)	Вмонтований (вм)	

Лінгвістичним висловлюванням, наведеним в табл. 4, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом

$$\mu_n(Z) = \mu_b(z_1) \wedge \mu_n(z_2) \wedge \mu_{тр}(z_3) \vee \mu_b(z_1) \wedge \mu_n(z_2) \wedge \mu_{вм}(z_3); \tag{18}$$

$$\mu_{нс}(Z) = \mu_b(z_1) \wedge \mu_{ср}(z_2) \wedge \mu_{тр}(z_3) \vee \mu_3(z_1) \wedge \mu_n(z_2) \wedge \mu_{тр}(z_3) \vee \mu_3(z_1) \wedge \mu_{ср}(z_2) \wedge \mu_{тр}(z_3); \tag{19}$$

$$\mu_c(Z) = \mu_3(z_1) \wedge \mu_{ср}(z_2) \wedge \mu_{вм}(z_3) \vee \mu_n(z_1) \wedge \mu_{ср}(z_2) \wedge \mu_{тр}(z_3) \vee \mu_3(z_1) \wedge \mu_b(z_2) \wedge \mu_{тр}(z_3); \tag{20}$$

$$\mu_{вс}(Z) = \mu_3(z_1) \wedge \mu_{ср}(z_2) \wedge \mu_{вм}(z_3) \vee \mu_{зд}(z_1) \wedge \mu_b(z_2) \wedge \mu_{вм}(z_3) \vee \mu_n(z_1) \wedge \mu_{ср}(z_2) \wedge \mu_{вм}(z_3); \tag{21}$$

$$\mu_b(Z) = \mu_n(z_1) \wedge \mu_b(z_2) \wedge \mu_{тр}(z_3) \vee \mu_n(z_1) \wedge \mu_b(z_2) \wedge \mu_{вм}(z_3). \tag{22}$$

Проведемо дефазифікацію на рівні впливу типу інтенсифікації теплообміну, для чого використаємо значення функції належності факторів, які наведені в табл. 4.

Використовуючи аналітичні формули (18)—(22) та значення функцій належності змінних (z₁), (z₂), (z₃), (табл. 5) можна отримати значення функцій належності терм-оцінок змінної Z.

Таблиця 5

Значення функції належності факторів, що впливають на інтенсифікацію теплообміну.

Фактор	Значення функції належності термів для оцінки факторів
Гradient температур (z ₁)	$\mu_b(z_1) = 0,12; \mu_{зд}(z_1) = 0,35; \mu_n(z_1) = 0,53;$
Інтенсифікація теплообміну (z ₂)	$\mu_n(z_2) = 0,26; \mu_c(z_2) = 0,43; \mu_b(z_2) = 0,84;$
Тип теплообмінника (z ₃)	$\mu_{тр}(z_3) = 0,45; \mu_{вм}(z_3) = 0,68;$

$$\mu_n(Z) = 0,12 \wedge 0,26 \wedge 0,45 \vee 0,12 \wedge 0,26 \wedge 0,68 = 0,12; \tag{18}$$

$$\mu_{нс}(Z) = 0,12 \wedge 0,43 \wedge 0,45 \vee 0,35 \wedge 0,26 \wedge 0,45 \vee 0,35 \wedge 0,43 \wedge 0,45 = 0,35; \tag{19}$$

$$\mu_c(Z) = 0,35 \wedge 0,43 \wedge 0,68 \vee 0,53 \wedge 0,43 \wedge 0,45 \vee 0,35 \wedge 0,84 \wedge 0,45 = 0,43; \tag{20}$$

$$\mu_{вс}(Z) = 0,35 \wedge 0,43 \wedge 0,68 \vee 0,35 \wedge 0,84 \wedge 0,68 \vee 0,53 \wedge 0,43 \wedge 0,68 = 0,43; \tag{21}$$

$$\mu_b(Z) = 0,53 \wedge 0,84 \wedge 0,45 \vee 0,53 \wedge 0,84 \wedge 0,68 = 0,53. \tag{22}$$

Таким чином, провівши дефазифікацію нечітких термів, що належать до впливу стабільності режиму на вихід біогазу, отримано значення, впливаючи на які можна прогнозувати та надавати оцінку інтенсифікації виробництва біогазу.

Використовуючи дану методику в комплексі для всіх підрівнів та рівнів, можна отримати прогнозовану оцінку активуючого впливу наведених факторів на виробництво біогазу в реакторах.

Техніка нечіткого логічного висновку, що застосовувалася до інформації, яка зібрана на попередніх етапах, дозволяє обчислити показник, який прогнозується як нечіткі множини. Нечіткі множини визначають ступінь виходу біогазу з реактора для фіксованого вектора факторів, що впливають. Щоб перейти від отриманих нечітких множин до кількісної оцінки, необхідно виконати процедуру дефазифікації, тобто перетворення нечіткої інформації в чітку форму. Серед різних методів дефазифікації найпоширенішим є метод «Centroid» — центр тяжіння плоскої фігури, яка обмежена функцією належності нечіткої множини та горизонтальною координатою. Модель нечіткого логічного висновку разом з процедурою дефазифікації забезпечує можливість спостереження за змінами вихідного показника – ступеня підвищення продуктивності реактора при анаеробному бродінні. Використовуючи дану методику в комплексі для всіх підрівнів та рівнів, можна отримати прогнозовану оцінку активуючого впливу наведених факторів на продуктивність роботи біореактора.

Висновки

Виробництво біогазу в реакторах пропонується розглядати як сукупність параметрів, що здатні характеризувати вплив типу і якості сировини, конструкції реактора, стабільності режиму.

Розроблено методику формалізації факторів, що впливають на вибір моделі та запропоновано класифікацію факторів, які впливають на інтенсифікацію виробництва біогазу в реакторах.

Запропоновано дерево логічного висновку ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на прийняття організаційно-технічних рішень, зі збільшення виробництва біогазу.

Оцінювання інтенсифікації теплообміну виконано з використанням доступної експертно-лінгвістичної інформації у вигляді правил «ЯКЦЮ-ТО», що пов'язують логічні терми вхідних і вихідних змінних. Результати моделювання дозволяють, використовуючи наявну експертно-моделюючу інформацію, оцінювати та прогнозувати вплив наведених факторів на процес анаеробного бродіння в біореакторі при виробництві біогазу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ротштейн О. П., Ларюшкін Є. П., Кательніков Д. І. Багатофакторний аналіз технологічного процесу біоконверсії на основі лінгвістичної інформації // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 1997. — № 3. — С. 38—45.
2. Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Джеджула В. В. Закономірності розподілу температурних напорів за умов локального газорідного омивання поверхні // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2003. — № 4. — С. 42—45.
3. Баадер Б., Доне Е., Брендерфер М. Биогаз: Теория и практика. — М.: Колос, 1982. — 148 с.
4. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации. Нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. — Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. — 320 с.
5. Митюшкин Ю. И., Мокин Б. И., Ротштейн А. П. Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний. — Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. — 145 с.
6. Лялюк О. Г. Управління проектами зменшення радонебезпеки в будівництві. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. — 139 с.
7. Ратушняк Г. С., Джеджула В. В. Підвищення продуктивності біогазового реактора управлінням параметрами вільноконвективних процесів теплообміну // Вісник Хмельницького національного університету. — 2006. — № 2. — С. 29—31.

Ратушняк Георгій Сергійович — завідувач кафедри, **Джеджула В'ячеслав Васильович** — аспірант.

Кафедра теплогазопостачання, Вінницький національний технічний університет