УДК 62-523.6 DOI 10.31548/energiya2022.02.018

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ БІОГАЗОВОГО РЕАКТОРА В НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ ПРИ МЕЗОФІЛЬНОМУ РЕЖИМІ ЗБРОДЖУВАННЯ

М. М. Заблодський, доктор технічних наук, професор

М. О. Сподоба, аспірант

О. О. Сподоба, канд. техн. наук (PhD)

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: spmisha@ukr.net

Анотація. *Метою роботи є експериментальне дослідження енергетичних втрат біогазового реактора в навколишнє середовище для мезофільного режиму зброджування з метою визначення шляхів збільшення тривалості фази охолодження субстрату та зниження енерговитрат на процес утворення біогазу і підвищення рентабельності його переробки в теплову та електричну енергії. Для досягнення поставлених цілей вирішено такі задачі: розроблено методологічний підхід для проведення експериментальних досліджень; виготовлено експериментальну установку біогазового реактора з електротепломеханічною системою і автоматичним керуванням для перемішування та підігрівання субстрату; експериментально досліджено енергетичні втрати в навколишнє середовище для мезофільного режиму зброджування; проведено обробку, аналіз та порівняння отриманих експериментальних даних. Робоча гіпотеза досліджень полягала в тому, що використання електричного нагрівального кабелю, вмонтованого у лопаті мішалки, забезпечить триваліший процес охолодження субстрату до температури вмикання підігрівання, що забезпечить зниження енерговитрат на процес інтенсифікації утворення біогазу. Найбільш суттєвий результат дослідження полягає в отримані залежностей зміни температури нагрівального кабелю, субстрату у нижньому, середньому та верхньому ярусах реактора та тривалості охолодження субстрату до температури вмикання підігрівання в діючій біогазовій установці. Значимість приведених у роботі результатів експериментальних досліджень полягає в тому, що при розміщенні нагрівального кабелю, вмонтованого у лопаті мішалки, охолодження субстрату до температури вмикання підігрівання відбувається пізніше в середньому на 35 хвилин при зброджуванні в біогазовому реакторі об'ємом 40 літрів. Отримані результати і рекомендації можуть бути використані при проектуванні для підвищення енергоефективності процесів інтенсифікації біогазового виробництва та рентабельності подальшої переробки біогазу в теплову та електричну енергії.*

Ключові слова: ***експериментальне дослідження, тривалість охолодження субстрату, енергетичні втрати, енергоефективність, нагрівальний кабель***

Актуальність. Найбільшого розповсюдження для утилізації органічних відходів набула анаеробна обробка в біогазових реакторах. Останні розташовують на відкритому повітрі, а за законом теплової рівноваги при взаємодії двох тіл з різною температурою відбувається теплообмін, внаслідок чого їх температура врівноважується. Збільшення тривалості охолодження субстрату дозволяє знизити кількість вмикань системи підігрівання і споживання енергії за добу на процес інтенсифікації утворення біогазу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Утилізація органічних відходів у біогазових реакторах є одним з екологічно та економічно ефективних рішень для виробництва енергії у вигляді біогазу. Про це свідчить велика кількість наукових досліджень, направлених на підвищення виходу біогазу [1–5]. Зниження температури призводить до зниження інтенсивності метаноутворення, а втрачену теплоту необхідно поновлювати, що призводить до більших витрат енергоносіїв [6]. Існують різноманітні системи підігрівання сировини в процесі зброджування в біогазовому реакторі [4, 5–9]. Електричне підігрівання є найефективнішим, оскільки необхідна потужність відносно невелика [8]. Дослідження [9–11] свідчать про ефективність об'єднання перемішуючих пристроїв з електричними нагрівачами в одному електротепломеханічному пристрої, оскільки налипання бруду на поверхні нагрівача зменшується.

У роботі біогазового реактора виділяють три основні етапи: процес початкового нагрівання субстрату до температури бродіння; охолодження субстрату до температури ввімкнення підігрівання; підтримка стабільної температури бродіння. Тому стверджувати про енергоефективність системи інтенсифікації біогазового виробництва можна тільки на основі результатів проведених теоретичних та практичних досліджень витрати енергії на кожну із стадій. Тривалість фази охолодження субстрату до температури вмикання підігрівання відіграє одну з головних ролей у знижені енерговитрат на інтенсифікацію біогазового виробництва, оскільки на загальну кількість витраченої енергії для підтримання температурного режиму субстрату впливає тривалість охолодження останнього. Враховуючи вищерозглянуте, теоретичне та експериментальне визначення енерговитрат реактора

у навколишнє середовище для мезофільного режиму зброджування є актуальним завданням.

Мета роботи – експериментальне дослідження енергетичних втрат біогазового реактора у навколишнє середовище для мезофільного режиму зброджування для визначення шляхів збільшення тривалості фази охолодження субстрату, зниження енерговитрат на процес утворення біогазу і підвищення рентабельності його переробки у теплову та електричну енергії.

Матеріали та методи дослідження. Значне розповсюдження для підігрівання субстрату в реакторах отримала «класична» система електричного підігрівання – розміщення нагрівального кабелю на зовнішній стінці реактора. Однак, проведеними теоретичними дослідженнями систем підігрівання було виявлено більш «раціональну» систему електричного підігрівання – розміщення нагрівального кабелю у лопатях двоярусної лопатевої мішалки.

Система рівнянь, що описує динаміку зміни температури об'єктів при електричному підігріванню субстрату в реакторах має такий вигляд [11]:

– для «класичної» системи обігрівання:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{dT_{сп}}{d\tau}=\frac{P\cdot\xi+k_{із}\cdot F_{сп}\cdot\left(T_{із}-T_{сп}\right)}{c_{сп}\cdot m_{сп}};\\
&\frac{dT_{із}}{d\tau}=\frac{\left(k_{із}\cdot F_{сп}\cdot\left(T_{сп}-T_{із}\right)+k_{с}\cdot F_{к}\cdot\left(T_{с}-T_{із}\right)+k_{вт}\cdot F_{к.вт}\cdot\left(T_{нав}-T_{із}\right)\right)}{c_{із}\cdot m_{із}};\\
&f\left(\xi\right)=\begin{cases}\xi=0,\ якщо\ T_{із}\geq T_{к.ном}\\ \xi=1,\ якщо\ T_{із}<T_{к.ном}\end{cases};\\
&Q_{нагр}=\frac{\pi\cdot\left(T_{із}-T_{суб}\right)}{R_1+R_2}\cdot H_{к};\\
&\frac{dT_{с}}{d\tau}=\frac{\left(k_{с}\cdot F_{к}\cdot\left(T_{із}-T_{с}\right)+\alpha_1\cdot F_{с}\cdot\left(T_{суб}-T_{с}\right)+k_{l}\cdot\left(H_1-H_{к}\right)\cdot\left(T_{нав}-T_{с}\right)\right)}{c_{р}\cdot m_{р}};\\
&\frac{dT_{суб}}{d\tau}=\frac{Q_{нагр}+\alpha_1\cdot F_{с}\cdot\left(T_{с}-T_{суб}\right)}{c_{суб}\cdot m_{суб}}.
\end{aligned}\right\}\qquad(1)$$

– для «раціональної» системи обігрівання:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{dT_{сп}}{d\tau}=\frac{P\cdot\xi+k_{із}\cdot F_{сп}\cdot\left(T_{із}-T_{сп}\right)}{c_{сп}\cdot m_{сп}};\\
&\frac{dT_{із}}{d\tau}=\frac{\left(k_{із}\cdot F_{сп}\cdot\left(T_{сп}-T_{із}\right)+k_{л}\cdot F_{к1}\cdot\left(T_{л}-T_{із}\right)\right)}{c_{із}\cdot m_{із}};\\
&f\left(\xi\right)=\begin{cases}\xi=0,\ якщо\ T_{із}\geq T_{к.ном}\\ \xi=1,\ якщо\ T_{із}<T_{к.ном}\end{cases};\\
&\frac{dT_{л}}{d\tau}=\frac{\left(k_{л}\cdot F_{к1}\cdot\left(T_{із}-T_{л}\right)+\alpha_2\cdot F_{л}\cdot\left(T_{суб}-T_{л}\right)\right)}{c_{л}\cdot m_{л}};\\
&Q_{нагр}=\frac{T_{із}-T_{суб}}{R_3+R_4}\cdot\left(F_{л}\cdot n_1\right);\\
&\frac{dT_{суб}}{d\tau}=\frac{\left(Q_{нагр}+\alpha_2\cdot\left(F_{л}\cdot n_1\right)\cdot\left(T_{л}-T_{суб}\right)+k_{с}\cdot\left(F_{с}+F_{осн}\right)\cdot\left(T_{с}-T_{суб}\right)\right)}{c_{суб}\cdot m_{суб}};\\
&\frac{dT_{с}}{d\tau}=\frac{\left(k_{с}\cdot\left(F_{с}+F_{осн}\right)\cdot\left(T_{суб}-T_{с}\right)+k_{l}\cdot H_1\cdot\left(T_{н}-T_{с}\right)\right)}{c_{р}\cdot m_{р}}.
\end{aligned}\right\}\qquad(2)$$

де P – потужність нагрівального кабелю, Вт; $m_{сп}$, $m_{із}$, $m_{суб}$, $m_{р}$, $m_{л}$ – маса спіралі та ізоляції нагрівального кабелю, субстрату, реактора та лопаті відповідно, кг; $c_{сп}$, $c_{із}$, $c_{суб}$, $c_{р}$, $c_{л}$ – питома теплоємність спіралі та ізоляції нагрівального кабелю, субстрату, матеріалу, з якого виготовлений реактор, та лопаті відповідно, Дж/(кг·^{0}С); $T_{сп}$, $T_{із}$, $T_{суб}$, $T_{с}$, $T_{л}$, $T_{нав}$, $T_{к.ном}$ – температура спіралі та ізоляції нагрівального кабелю, субстрату, стінки реактора, лопаті, навколишнього середовища та номінальна температура поверхні нагрівального кабелю відповідно, ^{0}С; $k_{із}$ – коефіцієнт теплопередачі через товщину ізоляції нагрівального кабелю, Вт/(м^2·^{0}С); $F_{сп}$ – площа спіралі нагрівального кабелю, м^2; ξ – коефіцієнт регулювання; τ – час, с; $k_{с}$ – коефіцієнт теплопередачі у товщині стінки реактора, Вт/(м^2·^{0}С); $F_{к}$ – площа кабелю, притисненого до стінки реактора, м^2; ^{0}С; $F_{к.вт}$ – площа нагрівального кабелю, що віддає енергію через ізолюючий матеріал та захисний кожух у навколишнє середовище, м^2; $k_{вт}$ – коефіцієнт теплопередачі у навколишнє середовище, Вт/(м^2·^{0}С); α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки

реактора до об'єму субстрату, Вт/(м^2·^{0}С); F_c – внутрішня площа стінки реактора, м^2; k_l – лінійний коефіцієнт теплопередачі у навколишнє середовище, Вт/(м·^{0}С); H_1, $H_к$ – висота реактора та сумарна висота кабелю, змонтованого на стінці реактора відповідно, м; R_1 – термічний опір теплопровідності циліндричної стінки реактора, м·^{0}С/Вт; R_2 – термічний опір тепловіддачі від циліндричної стінки реактора до об'єму субстрату, м·^{0}С/Вт; $Q_{нагр}$ – тепловий потік від нагрівального кабелю до субстрату, Вт; $k_л$ – коефіцієнт теплопередачі від внутрішньої до зовнішньої стінки лопаті, Вт/(м^2·^{0}С); $F_{к1}$ – площа нагрівального кабелю, з якої теплота віддається через стінку лопаті до субстрату, м^2; α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої стінки лопаті до обсягу субстрату, Вт/(м^2·^{0}С); $F_л$ – площа поверхні лопаті, м^2; R_3 – термічний опір теплопровідності від внутрішньої до зовнішньої стінки лопаті, м·^{0}С/Вт; R_4 – термічний опір теплопровідності в об'ємі субстрату, м·^{0}С/Вт; n_1 – кількість лопатей, шт; $F_{осн}$ – площа основи реактора, м^2.

З використанням систем рівнянь (1) та (2) було проведено ряд теоретичних досліджень, проте стверджувати про енергетичну ефективність технологічного процесу інтенсифікації біогазового виробництва можна лише на основі проведених комплексних теоретичних та практичних досліджень. З цією метою проведено експериментальне дослідження енергетичних витрат у навколишнє середовище при мезофільному режимі зброджування.

Експериментальне дослідження проводили на виготовленій експериментальній установці – біогазовому реакторі з електротепломеханічною системою та автоматичним керуванням процесом перемішування та підігрівання субстрату. Зовнішній вигляд експериментальної установки наведено на рис. 1.



Рис. 1. Зовнішній вигляд експериментальної біогазової установки

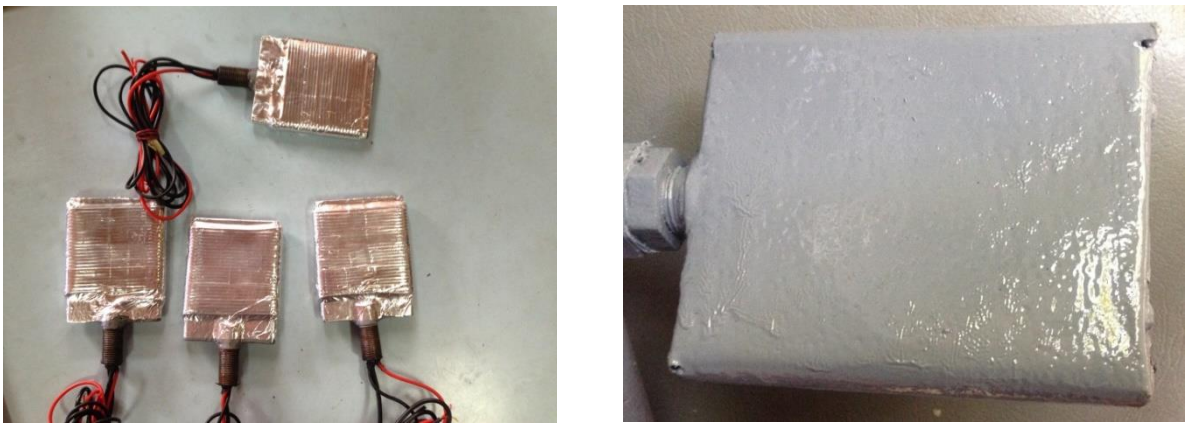
Для виготовлення біогазового реактора використано сталевий бак із такими геометричними параметрами: висота 0,6 м, діаметр 0,37 м, об'єм 0,06 м^3. Ізоляція реактора виконана з шару мінеральної вати завтовшки 100 мм. Для захисту ізоляційного шару від вологи та механічних пошкоджень реактор коаксіально розміщений усередині сталевого бака більшого діаметра. В експериментальних дослідженнях використано порівняльний аналіз двох систем електричного підігрівання: «класичної» – з розміщенням нагрівального кабелю на зовнішній стінці реактора (рис. 2) та «раціональної» – при розміщені нагрівального кабелю у лопатях мішалки (рис. 3).



Рис. 2. Електричний нагрівальний кабель, змонтований на зовнішню стінку біогазового реактора

Вал електротепломеханічної системи виконаний із порожнистої сталевої труби. Лопаті виготовлені із сталевих пластин із внутрішніми канавками, в які розміщений нагрівальний кабель із вуглецевого волокна.

Схема розташування та номенклатура вимірювального обладнання, використаного в експериментальній установці біогазового реактора з електротепломеханічною системою для перемішування та підігрівання субстрату, наведена у [12]. Як субстрат використовувалися попередньо подрібненні картопляні залишки масою 10 кг, розбавлені чистою водою в об'ємі 30 л і завантажені в реактор із заповненням на 2/3 його об'єму.

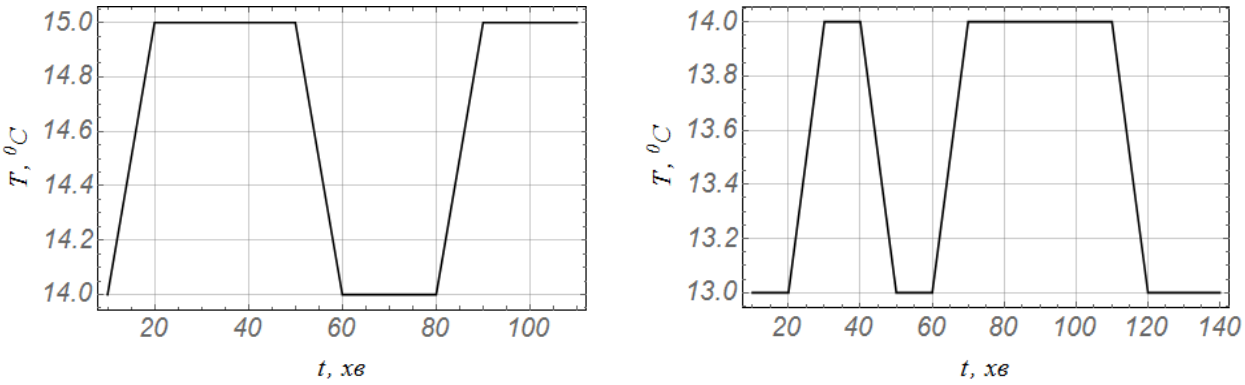


а *б*

Рис. 3. Лопаті, в яких розміщений електричний нагрівальний кабель:
а - розміщення нагрівального кабелю у лопаті; *б* – лопать зі встановленим захисним кожухом

Експериментальні дослідження проводилися в два етапи: перший етап – дослідження тривалості охолодження субстрату при розміщенні нагрівального кабелю на стінці реактора; другий етап – при розміщенні нагрівального кабелю в лопатях мішалки. В обох варіантах завантажений у біогазовий реактор субстрат підігрівали до температури 35,8 °С, після чого система перемішування та підігрівання вимикалася і далі проводили експериментальні дослідження енергетичних втрат у навколишнє середовище. Для вимірювання температури використано цифрові датчики DS18B20 з точністю 0.0625 °С. Живлення датчиків виконано за допомогою лабораторного блоку PeakTech 6225A, похибка вихідної напруги ≤0.01 % ± 1мВ. Покази вимірювальних датчиків реєструвалися безперервно та автоматично за допомогою розробленої системи автоматичного контролю та реєстрації. Температурний режим експериментів для двох етапів представлено на графіках зміни температури навколишнього середовища (рис. 4).

Під час охолодження субстрату у біогазовому реакторі при розміщені нагрівача на зовнішній стінці реактора середнє значення температури навколишнього середовища становило 14,63 °С, (рис. 4, *а*), а середнє значення вологості повітря – 58,09 %. При розміщені нагрівача у лопатях мішалки середнє значення температури становило 13,5 °С (рис. 4, *б*), а середнє значення вологості повітря 60,14 %.

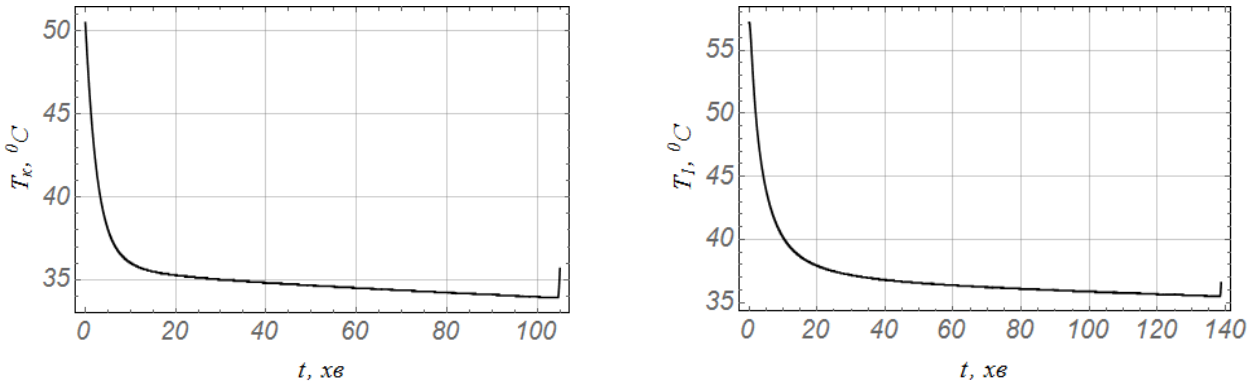


а *б*

Рис. 4. Графік зміни температури навколишнього середовища при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно:

а – на стінці біогазового реактора; *б* – у лопатях мішалки

Результати досліджень та їх обговорення. Порівнюючи температурний режим експериментальних досліджень (рис. 4), відмітимо, що середнє значення температури навколишнього середовища на першому етапі на 8 % вище, ніж при дослідженнях другого етапу. На рис. 5-8 наведено залежності зміни температури електричного нагрівального кабелю та субстрату у нижній, середній і верхній частинах біогазового реактора відповідно.



а *б*

Рис. 5. Графік зміни температури електричного нагрівального кабелю при розміщенні, відповідно:

а – на стінці реактора; *б* – у лопатях мішалки

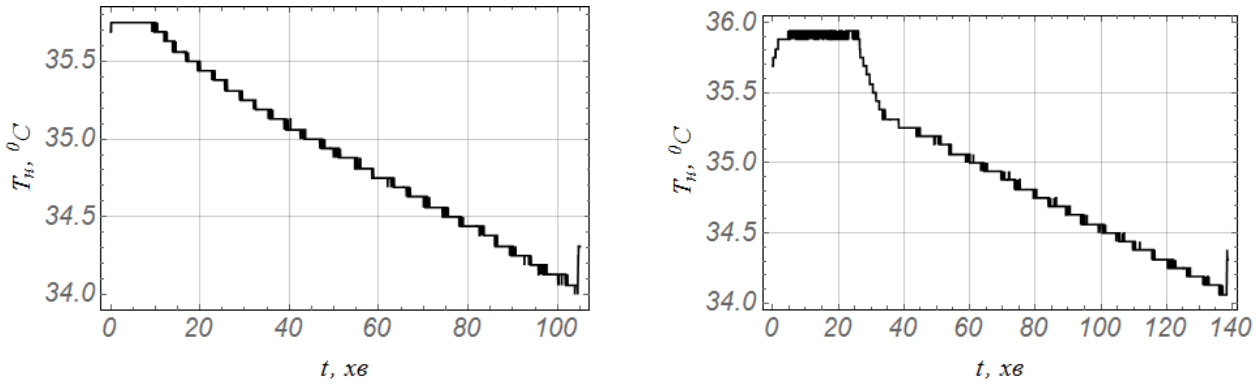
Аналізуючи графік зміни температури електричного нагрівального кабелю, розміщеного на стінці реактора (рис. 5, *а*), можна відмітити, що у перші 8 хвилин

охолодження відбувається лавиноподібне зниження температури кабелю до значення 36,5 °С, що пояснюється дією закону термодинамічної рівноваги. Подальше зниження температури має більш плавний характер та на момент ввімкнення підігрівання Δt=104 хв (рис. 5, *а*) температура кабелю набуває значення 33,91 °С. Середня температура кабелю складає 35,1 °С.

З графічних залежностей зміни температури нагрівального кабелю, розміщеного у лопатях мішалки (рис. 5, *б*), видно, що в перші 10 хв охолодження відбувається лавиноподібне зниження температури кабелю, розташованого у лопатях мішалки, до значення 40 °С. Охолодження кабелю до температури 36,5 °С відбувається протягом 53,7 хв з моменту початку охолодження системи, подальше зниження температури має плавний характер, а охолодження триває 139 хв. На момент ввімкнення системи підігрівання температура кабелю складає 35,5 °С. Середня температура кабелю 37,1 °С.

Порівнюючи між собою обидві системи, можна стверджувати, що тривалість охолодження при розміщенні нагрівального кабелю у лопатях мішалки на 25,2 % більше, а середнє та мінімальне значення температури нагрівального кабелю, розміщеного у лопатях мішалки, більше на 5,4 % та 4,5 % відповідно. При розміщені нагрівального кабелю у лопатях мішалки охолодження до температури 36,5 °С відбувається повільніше на 85,1 %.

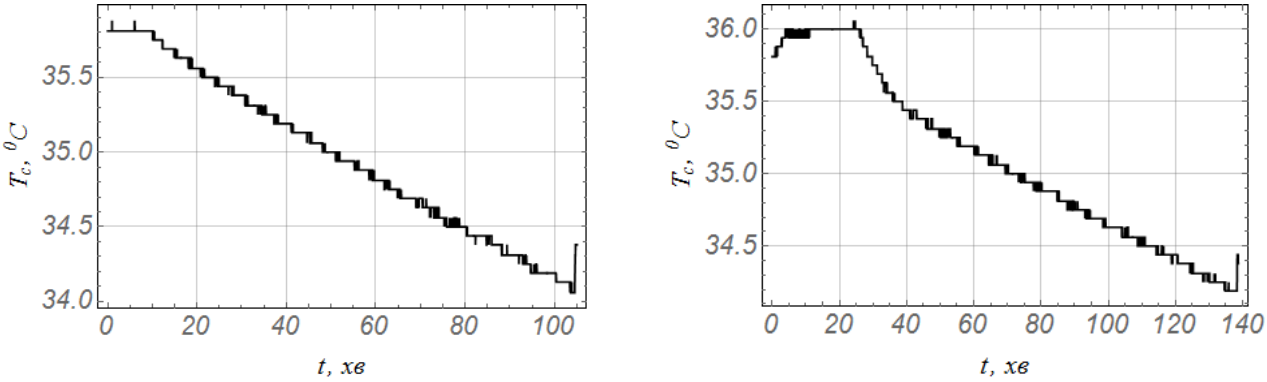
Тривалий процес охолодження, зображений на (рис. 5, *б*), пояснюється умовами теплопередачі. Оскільки електротепломеханічна система для перемішування та підігрівання субстрату знаходиться в центральній частині реактора, теплота від нагрівальної системи повинна пройти через кілька прошарків із власними термічними опорами, а саме: шар субстрату; стінка реактора; шар утеплювального матеріалу та захисний кожух. Внаслідок відсутності примусової конвекції у період охолодження, коефіцієнт теплопередачі менший, що дозволяє досягти тривалішого періоду охолодження. При класичній системі підігрівання теплота від нагрівального кабелю, розташованого на стінці реактора, розподіляється на два теплові потоки, один з яких надходить до стінки реактора та субстрату, інший через утеплювальний шар та захисний кожух – до навколишнього середовища.



а *б*

Рис. 6. Графік зміни температури субстрату в нижній частині реактора при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно:

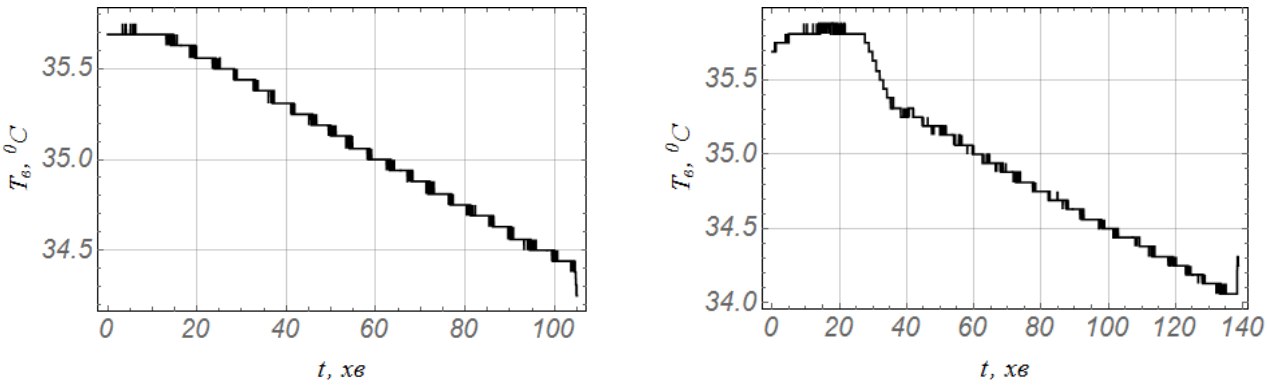
а – на стінці біогазового реактора; *б* – у лопатях мішалки



а *б*

Рис. 7. Графік зміни температури субстрату у середній частині реактора при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно:

а – на стінці біогазового реактора; *б* – у лопатях мішалки



а *б*

Рис. 8. Графік зміни температури субстрату у верхній частині реактора при розміщенні електричного нагрівального кабелю відповідно:

а – на стінці біогазового реактора; *б* – у лопатях мішалки

Аналізуючи графічні залежності зміни температури субстрату (рис. 6, *а*, 7, *а*, 8, *а*) можна дійти висновку, що після вимикання системи підігрівання температура субстрату залишається незмінною протягом 11 хв, в подальшому знижується за лінійним законом до температури 34 °С. Середнє значення температури субстрату у верхньому шарі складає 34,95 °С, середньому – 35,04 °С, нижньому – 35,1 °С. Середнє значення температури за об'ємом субстрату становить 35,03 °С. Максимальне значення температури субстрату 35,88 °С.

Аналізуючи графічні залежності (рис. 6, *б*, 7, *б*, 8, *б*), можна відмітити , що після вимикання системи підігрівання температура субстрату зростає протягом 5,5 хв та набуває максимальних значень у верхньому прошарку 35,9 °С, середньому 36,0 °С, нижньому 35,95 °С, які залишаються незмінними протягом 5,5…27 хв, у подальшому знижуючись за лінійним законом до температури 34 °С. Середнє значення температури субстрату у верхньому шарі становить 35,1 °С, середньому – 35 °С, нижньому – 34,99 °С. Середнє значення температури по об'єму субстрату 35,03 °С.

Порівнюючи між собою дві системи, помітно, що зміна температури субстрату, незалежно від ярусу та використаної системи підігрівання, відбувається за лінійним законом, однак фаза охолодження при розміщенні нагрівального кабелю у лопатях мішалки на 25,2 % більше, а максимальне значення температури більше на 0,12 °С. При цьому тривалість підтримки максимальної температури при розміщенні кабелю у лопатях мішалки на 59,3 % більше.

У теоретичних дослідженнях [13, 14] вказується на суттєвий вплив утеплювальних конструкцій на величину енергетичних втрат у навколишнє середовище, а відповідно, і тривалість зниження температури субстрату. Проте, наведені в цій роботі експериментальні дослідження вказують, що, як утеплювальні конструкції [13, 14], так і місце встановлення нагрівального пристрою, мають суттєвий вплив на швидкість охолодження субстрату і величину енергетичних втрат у навколишнє середовище.

Висновки і перспективи. Результати експериментальних досліджень енергетичних втрат у навколишнє середовище показали, що при «раціональній» системі підігрівання охолодження субстрату об'ємом 40 л до температури вмикання

підігрівання відбувається в середньому на 35 хв пізніше, тоді як, охолодження кабелю до температури 36,5 °С відбувається повільніше на 85,1%.

Встановлено, що місце розташування нагрівального пристрою має суттєвий вплив на швидкість енергетичних втрат у навколишнє середовище. Виявлено закономірність, що незалежно від ярусу та використаної системи підігрівання, зміна температури субстрату відбувається за лінійним законом, однак, тривалість охолодження при «раціональній» системі підігрівання на 25,2 % більше.

Встановлено, що порівняно з температурою кабелю, розміщеного на стінці реактора, середнє та мінімальне значення температури електричного нагрівального кабелю, розміщеного у лопатях мішалки, вище на 5,4 % та 4,5 % , відповідно. Встановлено, що у перші хвилини охолодження субстрату за використання «раціональної» системи підігрівання відбувається підвищення температури субстрату. При цьому тривалість підтримки максимальної температури субстрату на 59,3 % більше, порівняно з температурою субстрату при «класичній» системі підігрівання.

Список використаних джерел

1. Marks S., Dach J., Fernandez Morales F. J., Mazurkiewicz J., Pochwatka P., Gierz Ł. (2020). New Trends in Substrates and Biogas Systems in Poland. Journal of Ecological Engineering, Vol. 21, No. 4, pp. 19-25.

2. EBA (2019). EBA Statistical Report 2018; European Biogas Association: Brussels, Belgium.

3. WBA (2019). Global Potential of Biogas; World Biogas Association: London.

4. Deublein D., Steinhauser A. (2008). Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction. KGaA, Weinheim, p. 450.

5. Scarlat N., Dallemand J.-F., Fahl F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. Renew. Energy, No. 129, pp. 457–472.

6. Janczak D., Mazurkiewicz J., Czekała W., Myszura M., Kozłowski K., Jeżowska A. (2019). A Possibility of Functioning Biogas Plant at a Poultry Farm. Journal of Ecological Engineering, Vol. 20, No. 11, pp. 225-231.

7. Rashed M. B. (2014). The Effect of Temperature on the biogas Production from Olive Pomace. University Bulletin ISSUE, Vol. 3, No. 16 pp. 135-148.

8. Teleszewski T. J., Zukowski M. (2018). Analysis of Heat Loss of a Biogas Anaerobic Digester in Weather Conditions in Poland. Journal of Ecological Engineering, Vol. 19, No. 4, pp. 242–250.

9. Сподоба, М. О., Заблодський, М. М., Радько І. П. Основні складові методології побудови заглибного електромеханічного перетворювача для біогазових комплексів. V Міжнародна науково-практична конференція присвячена пам'яті

професора В. М. Синькова «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК». К.: НУБіП, 2019.

10. Заблодський М. М., Сподоба М. О. Обґрунтування створення електротепломеханічної системи перемішування та підігріву біомаси. Енергетика та автоматика. 2020. №5. С. 136-148 с.

11. Zablodskiy M., Spodoba M. (2021). Dynamic Analysis of Energy Consumption During Substrate Fermentation in a Biogas Reactor, *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 147-152.

12. Заблодський М. М., Сподоба М. О. Методика проведення експериментальних досліджень біогазового реактора з заглибною комбінованою системою перемішування та електричного підігріву. Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)». Київ, 19-22 травня 2020.

13. Z. Mykola, S. Mykhailo. (2020). Mathematical Model Of Thermal Processes During The Fermentation Of Biomass In A Biogas Reactor, *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 227-231.

14. Zablodskiy M., Spodoba M. (2020). Numerical study of energy losses in the environment for mesophilic fermentation regime. *Energy and Automation*, 4, pp. 97-108.

References

1. Marks, S., Dach, J., Fernandez Morales, F. J., Mazurkiewicz, J., Pochwatka, P., Gierz, Ł. (2020). New Trends in Substrates and Biogas Systems in Poland. Journal of Ecological Engineering, 21, 4, 19-25.

2. EBA (2019). EBA Statistical Report 2018; European Biogas Association: Brussels, Belgium.

3. WBA (2019). Global Potential of Biogas; World Biogas Association: London.

4. Deublein, D., Steinhauser, A. (2008). Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction. KGaA, Weinheim, 450.

5. Scarlat, N., Dallemand, J.-F., Fahlm F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. Renew. Energy, 129, 457–472.

6. Janczak, D., Mazurkiewicz, J., Czekała, W., Myszura, M., Kozłowski, K., Jeżowska, A. (2019). A Possibility of Functioning Biogas Plant at a Poultry Farm. Journal of Ecological Engineering, 20 (11), 225-231.

7. Rashed, M. B. (2014). The Effect of Temperature on the biogas Production from Olive Pomace. University Bulletin ISSUE, 3 (16), 135-148.

8. Teleszewski, T. J., Zukowski, M. (2018). Analysis of Heat Loss of a Biogas Anaerobic Digester in Weather Conditions in Poland. Journal of Ecological Engineering, 19 (4), 242–250.

9. Spodoba, M. O., Zablodskiy, M. M., Radko, I. P. (2019). The main components of the methodology of construction of immersion electromechanical converter for biogas complexes. V International scientific-practical conference dedicated to the memory of Professor V. M. Sinkov "Problems and prospects of energy, electrical technology and automation in agriculture", NULES.

10. Zablodskiy, M. M., Spodoba, M. O. (2020). Rationale for creating an electro-thermomechanical system for mixing and heating biomass. Energy and Automation, 5, 136-148.

11. Zablodskiy, M., Spodobam M. (2021). Dynamic Analysis of Energy Consumption During Substrate Fermentation in a Biogas Reactor, 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 147-152.

12. Zablodskiy, M. M., Spodoba, M. O. (2020). Methods of conducting experimental studies of a biogas reactor with immersion combined mixing and electric heating system. Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference "Problems of modern energy and automation in the system of nature management (theory, practice, history, education)", Kyiv, May 19-22, 2020.

13. Z. Mykola, S. Mykhailo (2020). Mathematical Model Of Thermal Processes During The Fermentation Of Biomass In A Biogas Reactor, 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 227-231.

14. Zablodskiy, M., Spodoba, M. (2020). Numerical study of energy losses in the environment for mesophilic fermentation regime. Energy and Automation, 4, 97-108.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ БИОГАЗОВОГО РЕАКТОРА В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ МЕЗОФИЛЬНОМ РЕЖИМЕ СБРАЖИВАНИЯ

Н. Н. Заблодский, М. А. Сподоба, А. А. Сподоба

Аннотация. *Целью работы является экспериментальное исследование энергетических потерь биогазового реактора в среду для мезофильного режима сбраживания для определения путей увеличения продолжительности фазы охлаждения субстрата и снижения энергозатрат на процесс образования биогаза и повышения рентабельности его переработки в тепловую и электрическую энергии. Для достижения поставленных целей решены следующие задачи: разработан методологический подход для проведения экспериментальных исследований; изготовлена экспериментальная установка биогазового реактора с электротепломеханической системой и автоматическим управлением для перемешивания и подогрева субстрата; экспериментально исследованы энергетические потери в окружающую среду для мезофильного режима сбраживания; проведена обработка, анализ и сравнение полученных экспериментальных данных. Рабочая гипотеза исследований заключалась в том, что использование электрического нагревательного кабеля, встроенного в лопасти мешалки, обеспечит более длительный процесс охлаждения субстрата до температуры включения подогрева, что обеспечит снижение энергозатрат на процесс интенсификации образования биогаза. Наиболее существенный результат исследования состоит в получении зависимостей изменения температуры нагревательного кабеля, субстрата в нижнем, среднем и верхнем ярусах реактора и продолжительности охлаждения субстрата до температуры включения подогрева в действующей биогазовой установке. Значимость приведенных в работе результатов экспериментальных исследований состоит в том, что при размещении нагревательного кабеля, встроенного в лопасти мешалки, охлаждение субстрата до температуры включения подогрева происходит позже в среднем на 35 минут при сбраживании в биогазовом реакторе объемом 40 л. Полученные*

результаты и рекомендации могут использоваться при проектировании для повышения энергоэффективности процессов интенсификации биогазового производства и рентабельности дальнейшей переработки биогаза в тепловую и электрическую энергии.

Ключевые слова: ***экспериментальное исследование, длительность охлаждения субстрата, энергетические потери, энергоэффективность, нагревательный кабель***.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ENERGY LOSSES OF A BIOGAS REACTOR IN THE ENVIRONMENT FOR MESOPHILIC MODE OF FERMENTATION

M. Zablodskiy, M. Spodoba, O. Spodoba

Abstract. *The aim of the work is an experimental study of energy losses to the environment for the mesophilic mode of fermentation in order to increase the duration of substrate cooling and reduce energy costs for the process of biogas formation. To achieve the goals set, the following tasks have been solved: a methodological approach has been developed for conducting experimental studies; an experimental plant for a biogas reactor with an electrothermal-mechanical system with automatic control for mixing and heating the substrate was made; experimentally investigated energy losses to the environment for the mesophilic mode of fermentation; processing, analysis and comparison of the obtained experimental data were carried out. The working hypothesis of the research was that the use of an heating cable built into the stirrer paddles would provide a longer process of cooling the substrate to the heating switch-on temperature, which would reduce energy costs for the biogas formation intensification process. The most significant result of the study is to obtain the dependences of the change in the temperature of the heating cable, the substrate in the lower, middle and upper tiers of the reactor and the duration of the substrate cooling to the heating switch-on temperature in the operating biogas plant. The significance of the results of experimental studies lies in the fact that when placing a heating cable built into the stirrer paddles, the process of cooling the substrate to the heating switch-on temperature occurs later, on average, by 35 minutes, when the substrate is fermented in a biogas reactor with a volume of 40 liters. The implementation of the data obtained will increase the energy efficiency of the processes of intensification of biogas production and the profitability of further processing of biogas into heat and electricity.*

Key words: ***experimental research, duration of substrate cooling, energy losses, energy efficiency, heating cable***