

УДК 621.181.7

Ю. В. КУРІС, канд. техн. наук

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, м. Київ

І. Ф. ЧЕРВОНИЙ, д-р. техн. наук

Ю. С. КАЛІНЦЕВА, магістр

Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ПІДВОДА ТЕПЛОТИ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ СУШКИ МАТЕРІАЛУ

*В данной статье установлено, что наименьшее время сушки остатка анаэробной ферментации наблюдается при применении сушки воздухом, разбавленным продуктами сгорания биогаза. Наихудшие показатели наблюдаются при обработке материала воздухом без привлечения постороннего источника энергии. Допустимыми значениями времени сушки и степени сухости вещества обладает сушка воздухом, нагретым в теплообменнике и сушка инфракрасным излучением.*

*При сушке инфракрасным излучением остатка анаэробной ферментации следует руководствоваться следующими параметрами:*

- ▶ *толщина слоя не должна превышать 45 мм, так как при увеличении толщины происходит недостаточная обработка нижних слоев материала, при этом верхние слои экранируют излучение;*
- ▶ *диаметр гранул следует принимать не более 15 мм;*
- ▶ *тепловой поток при инфракрасной сушке остатка анаэробной ферментации не должен превышать 70 кВт/м<sup>2</sup>, так как его увеличение приводит к обугливания материалов и разрушению полезных органических веществ.*

*У даній статті встановлено, що найменший час сушки залишку анаеробної ферментації спостерігається при вживанні сушки повітрям, розбавленим продуктами згорання біогазу. Найгірші показники спостерігаються при обробці матеріалу повітрям без залучення стороннього джерела енергії. Допустимими значеннями часу сушки і міри сухості речовини володіє сушка повітрям, нагрітим в теплообміннику і сушка інфрачервоним випромінюванням.*

*При сушці інфрачервоним випромінюванням залишку анаеробної ферментації слід керуватися наступними параметрами:*

- ▶ *товщина шару не повинна перевищувати 45 мм, оскільки при збільшенні товщини відбувається недостатня обробка нижніх шарів матеріалу, при цьому верхні шари екранують випромінювання;*
- ▶ *діаметр гранул слід приймати не більше 15 мм;*
- ▶ *тепловий потік при інфрачервоній сушці залишку анаеробної ферментації не повинен перевищувати 70 кВт/м<sup>2</sup>, оскільки його збільшення приводить до обуглювання матеріалів і руйнуванню корисних органічних речовин.*

### Вступ

Сушка є важливою складовою частиною багатьох промислових технологічних процесів, і від її правильної організації залежать експлуатаційні витрати, якість продукції та обсяг забруднюючих речовин, які поступають у навколишнє середовище. При цьому споживання енергоресурсів має бути мінімальним, а використання всіх видів

низькопотенціальної теплоти і залучення в господарський оборот нетрадиційних джерел енергії - максимальним.

### **Визначення оптимального режиму процесу сушки залишку анаеробної ферментації з використанням біогазу як джерела теплової енергії**

Основним завданням є визначення оптимального режиму процесу сушки і конструкції сушильного пристрою. Розрахунок сушильної установки повинен ґрунтуватися на властивостях об'єкта сушки і закономірностях кінетики процесу.

На практиці для обробки дисперсних матеріалів найчастіше застосовують інфрачервону і конвективну сушку.

Для визначення ефективності цих методів сушки стосовно до залишку анаеробної ферментації проведено ряд дослідів по термічній сушки.

Як критерій оптимізації вибрані ступінь сухості речовини  $S$ , кг/кг сух. реч., що представляє собою відношення маси випарувавшийся вологи до маси абсолютно сухої речовини, і час сушіння,  $\tau$ , хв.

### **Основна частина**

#### **Експериментальні дослідження процесу сушки інфрачервоним випромінюванням зброженого субстрату при використанні біогазу у якості палива**

Для визначення впливу параметрів об'єкта сушки, а також способу підвода теплоти на ступінь сухості речовини і час обробки матеріалу, проведено ряд дослідів.

У ході експериментальних досліджень використовували наступне обладнання:

- сітчастий піддон площею  $0,0396 \text{ м}^2$ ;
- пальник інфрачервоного випромінювання типу ГІМ-2 номінальною тепловою потужністю –  $2,3 \text{ кВт}$ ;
- лічильник газовий марки ГСБ-400.

Сушка здійснювалася в закритому металевому коробі з габаритними розмірами  $500 \times 500 \times 300 \text{ мм}$  (рис. 1.).

Для визначення впливу положення випромінюючої поверхні пальника інфрачервоного випромінювання на час сушіння, зокрема, вплив конвективного струму при розташуванні випромінюючої панелі вгору та випромінювання від піддону при розташуванні випромінюючої панелі вниз, проведений однофакторний експеримент.

При проведенні експерименту приймалися фіксовані рівні положення випромінюючої панелі (напрямок теплового потоку вгору і вниз). У ході експерименту проводилися по два дублюючих дослідів. Умови і результати експерименту наведено в табл. 1. У якості результатів наведені значення ступені сухості речовини, при діаметрі гранул  $10 \text{ мм}$  і товщині шару вихідного матеріалу  $30 \text{ мм}$ . Час проведення дослідів  $21 \text{ хвилини}$ . Висота установки пальника  $320 \text{ мм}$ . Відстань між пальником і матеріалом, що обробляється прийнято на підставі ранніх дослідів і відповідає тепловому потоку, при якому не відбувається обуглювання матеріалу.

Обробка результатів здійснювалася з припущенням, що помилка відтворюваності розподілена нормально з нульовим математичним очікуванням і дисперсією  $\sigma_{\text{пом}}^2$ . Дисперсійний аналіз виконаний за методикою, викладеною в [1, 4, 5].

Для перевірки нульової гіпотези визначався критерій Фішера для рівня значимості  $p = 0,05$  і ступенях свободи  $1$  і  $2$   $F_{0,95}(1,2) = 18,5$ . Дисперсійне співвідношення для даного експерименту визначалося за формулою:

$$F = S_A^2 / S_{\text{пом}}^2, \quad (1)$$

де  $S_A^2$  – дисперсія фактора  $A$ ;

$S_{\text{пом}}^2$  – вибіркова дисперсія, що характеризує фактор випадковості.

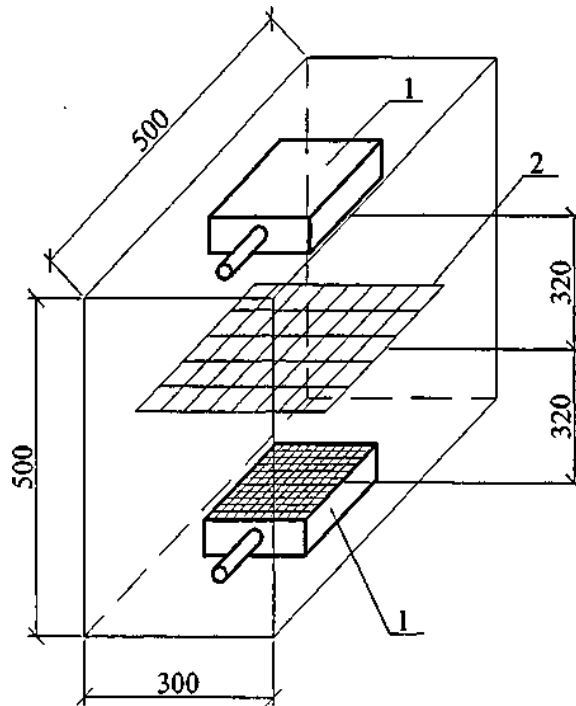


Рис. 1. Схема експериментальної установки для визначення впливу параметрів інфрачервоної сушки на критерії оптимізації:

1 – газогорілочний пристрій інфрачервоного випромінювання; 2 – сітчастий піддон

Таблиця 1

Умови та результати однофакторного експерименту з визначення впливу положення випромінюючої насадки пальника інфрачервоного випромінювання з рівною кількістю повторних дослідів

№ повторного дослідів	Направлення теплового потоку	
	вгору	вниз
1	0,362	0,449
2	0,346	0,452

Для проведеного експерименту  $F=0,00931/6,6 \cdot 10^{-5}=140$ . Порівняння дисперсійних відносин з критерієм Фішера показало, що вплив досліджуваного фактору слід вважати значимим:  $F \gg F_{0,95}(1,2)$ . Це означає, що положення випромінюючої панелі пальника інфрачервоного випромінювання значно впливає на час сушіння.

Встановлення пальника інфрачервоного випромінювання під оброблюваним матеріалом веде до зниження інтенсивності теплового потоку за рахунок екранування випромінювання піддоном, при цьому конвективний струм, що піднімається від випромінюючої насадки пальника, незначно впливає на процес сушки.

Розташування випромінюючої насадки при радіаційній сушці має бути зверху оброблюваного матеріалу. У цьому випадку променистий потік безперешкодно потрапляє на його поверхню, при цьому піддон, на якому знаходиться матеріал, перевипромінює частину енергії, що підвищує ефективність сушки.

Для визначення впливу товщини шару висушуваного матеріалу і діаметру гранул на час сушки проведено двохфакторний експеримент.

Результат спостереження може бути представлений наступною моделлю [1, 2, 4, 5]:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha_i\beta_j + \varepsilon_{ij}, \quad (2)$$

де  $\mu$  – сумарний ефект у всіх дослідах;

$\alpha_i$  – ефект першого фактору на  $i$ -му рівні ( $i= 1,2, \dots, k$ );

$\beta_j$  – ефект другого фактору на  $j$ -му рівні ( $j= 1,2, \dots, k$ );

$\alpha_i \beta_j$  – ефект взаємодії факторів;

$\varepsilon_{ijq}$  – враховує варіацію всередині серії дослідів (помилка відтворюваності),

( $q = 1, 2, \dots, m$ ).

При проведенні експерименту приймалися фіксовані рівні діаметрів гранул і товщини шару. Діаметр гранул і товщина шару варіювалися на трьох рівнях. У ході експерименту проводилося по два дублюючих дослідів при кожному поєднанні рівнів факторів. Умови і результати експерименту наведено в табл. 2. У якості результату наведені значення ступеню сухості речовини, кг/кг сух. реч. Висота установки пальника – 320 мм. Час проведення дослідів 21 хвилина.

Таблиця 2

Умови і результати двохфакторного експерименту з визначення впливу діаметра гранул і товщини шару матеріалу з рівною кількістю повторних дослідів

Діаметр гранул $d$ , мм	Ступінь сухості речовини $S$ , кг/кг сух.реч., при товщини шару $\delta$ , мм		
	15	30	45
5	1,465	0,607	0,396
10	0,643	0,449	0,245
15	0,580	0,254	0,251

Обробка результатів здійснювалася з припущенням, що помилка відтворюваності розподілена нормально з нульовим математичним очікуванням і дисперсією  $\sigma_{\text{пом}}^2$ . Дисперсійний аналіз виконаний за методикою, викладеною в [1,2,3].

Для визначення впливу окремих факторів і їх взаємодії застосовувалися критерії Фішера для рівня значимості  $p = 0,05$ : для факторів А і В при ступенях свободи 2 і 9  $F_{(0,95)}(2,9)=4,3$ ; для ефекту взаємодії факторів А і В при ступенях свободи 4 і 9  $F_{(0,95)}(4,9)=3,6$ . Дисперсійне відношення, для фактора А (діаметр гранул) склало  $F_A = 37331$ , для фактора В (товщина шару матеріалу) –  $F_B=23077$ , для ефекту взаємодії факторів –  $F_{AB}= 6589$ . Порівняння дисперсійних відносин з критеріями Фішера показало, що діаметр гранул і товщина шару матеріалу, а також ефект взаємодії факторів між собою, мають великий вплив на значення ступеню сухості речовини.

Значимість діаметра гранул і товщини шару матеріалу перевірялася шляхом порівняння рівнів з використанням рангового критерію Дункана. Підраховують нормовану помилку середнього за формулою:

$$s_y = \sqrt{S_{\text{пом}}^2 / (km)}, \quad (3)$$

де  $k$  – число рівнів фактора А;

$m$  – кількість повторних дослідів.

Для проведеного експерименту  $s_y = \sqrt{0,0000157 / 3 \cdot 2} = 0,0016$ .

Для визначення значимості діаметра гранул і товщини шару матеріалу розташували середні значення фактора А і В у порядку зростання.

Фактор А:  $\bar{y}_3 = 0,36$ ;  $\bar{y}_2 = 0,49$ ;  $\bar{y}_1 = 0,82$ . Фактор В:  $\bar{y}_3 = 0,3$ ;  $\bar{y}_2 = 0,44$ ;  $\bar{y}_1 = 0,89$ .

Значимі ранги для ступенів свободи:

$$n_D = nk(m - 1) = 3 \cdot 3 \cdot (2 - 1) = 9, \quad (4)$$

де  $n$  – число рівнів фактора.

Дані розрахунку рангів значимості наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Визначення рангів значимості за критерієм Дункана для двохфакторного експерименту з дослідження залежності інтенсивності сушки від діаметра гранул матеріалу і товщини шару

$p$	2	3	4
Ранги $r$	3,2	3,34	3,41
$r \cdot S_y$	0,010342	0,010794	0,01102

Таким чином, в результаті визначення різниці між середніми та оцінки значимості рівнів факторів А і В, можна зробити наступні висновки.

Діаметр гранул оброблюваного матеріалу в діапазоні від 5 до 15 мм оказує істотний вплив на інтенсивність процесу сушки. Товщина шару в межах від 15 до 45 мм також впливає на ступінь сухості речовини. Грунтуючись на аналізі тенденції зниження ступеня сухості речовини, можна укласти, що збільшення товщини шару оброблюваного матеріалу не призведе до збільшення інтенсивності сушки. Збільшення діаметра гранул понад 15 мм також не призведе до зменшення часу сушіння, тому що зменшується поверхня теплообміну і знижується інтенсивність проникнення теплового потоку за рахунок коркоутворення.

На третьому етапі експерименту для одержання математичної моделі був побудований факторний експеримент  $2^k$ , але отримане рівняння неадекватно описувало експеримент, тому був складений центральний композиційний план Бокса-Уілсона, приведений до ортогонального виду.

План побудований для двох факторів (діаметр гранул  $d$  і товщина висушуємого шару  $\delta$ ) при зміні кожного фактора на трьох рівнях. Загальне число дослідів склало  $N=9$ . Матриця композиційного плану після перетворення квадратичних стовпців наведена в табл. 4.

Таблиця 4

Матриця композиційного плану Бокса-Уілсона для дослідження залежності ступеня сухості речовини від діаметра гранул матеріалу і товщини шару

№ дос- ліду	$d$ , мм	$\delta$ , мм	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1 \cdot x_2$	$x'_1$	$x'_2$	$y$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5	15	+1	-1	-1	+1	0,333	0,333	1,465
2	5	30	+1	-1	0	0	0,333	-0,666	0,607
3	5	45	+1	-1	+1	-1	0,333	0,333	0,396
4	10	15	+1	0	-1	0	-0,666	0,333	0,643
5	10	30	+1	0	0	0	-0,666	-0,666	0,449
6	10	45	+1	0	+1	0	-0,666	0,333	0,245
7	15	15	+1	+1	-1	-1	0,333	0,333	0,58
8	15	30	+1	+1	0	0	0,333	-0,666	0,254
9	15	45	+1	+1	+1	+1	0,333	0,333	0,251

В результаті обчислень отримані такі значення коефіцієнтів рівняння регресії:  
 $b_0 = 0,339$ ;  $b_1 = -0,231$ ;  $b_2 = -0,299$ ;  $b_{12} = 0,185$ ;  $b_{11} = 0,147$ ;  $b_{22} = 0,160$ .

Для обчислення дисперсії відтворюваності проведено чотири додаткових досліди в центрі плану. Визначено дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії, перевірено їх значимість за критерієм Ст'юдента. Табличне значення критерію Ст'юдента визначалося для рівня значимості  $p = 0,05$  при числі ступенів свободи рівному 3  $t_p(3) = 3,18$ . Порівняння вихислених і табличного значень критерію Ст'юдента показало, що всі коефіцієнти в рівнянні регресії є значимими.

Для перевірки адекватності рівняння регресії визначено критерій Фішера, рівний відношенню залишкової дисперсії до дисперсії відтворюваності,  $F = 8,7$ . Порівняння значення критерію Фішера з табличним  $F_{(0,95)}(4,3) = 9,1$  показало, що отримане рівняння регресії адекватно експерименту.

Після перетворення рівняння регресії з безрозмірних координат в натуральний масштаб отримаємо рівняння наступного виду:

$$S = 3,367 - 0,2378 \cdot d - 0,08733 \cdot \delta + 0,00247 \cdot d \cdot \delta + 0,00588 \cdot d^2 + 0,0007 \cdot \delta^2 \quad (5)$$

За отриманим рівнянням регресії побудований графік залежності ступеня сухості речовини від товщини шару і діаметра гранул висушуємого матеріалу (рис. 2).

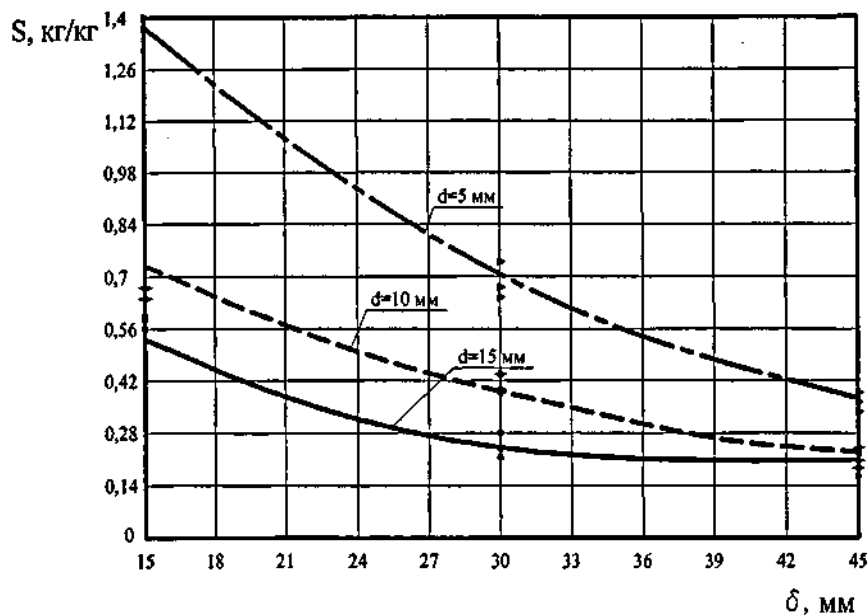


Рис. 2 Залежність ступеню сухості речовини від товщини шару і діаметру гранул висушуємого матеріалу

Аналіз графіка залежності (рис. 2) показує, що при збільшенні товщини шару оброблюваного матеріалу ступінь сухості речовини зменшується, простежується тенденція до «стягування» кривих в одну лінію при збільшенні товщини шару понад 45 мм, що підтверджує раніше зроблені висновки.

На основі проведених досліджень при інфрачервоній сушці залишку анаеробної ферментації слід керуватися наступними параметрами:

– товщина шару не повинна перевищувати 45 мм, так як при збільшенні товщини відбувається недостатня обробка нижніх шарів матеріалу, при цьому верхні шари екранують випромінювання;

– діаметр гранул слід приймати не більше 15 мм.

Дослід показав, що тепловий потік при інфрачервоній сушці залишку анаеробної ферментації не повинен перевищувати  $70 \text{ кВт/м}^2$ , так як його збільшення веде до обвуглювання матеріалу і руйнуванню корисних органічних речовин.

### Експериментальні дослідження режимів процесу конвективної сушки в сушарці з киплячим шаром

Для визначення ефективності використання конвективної сушки при обробці залишку анаеробної ферментації на експериментальній установці проведено ряд дослідів. Критеріями оптимізації послужили ступінь сухості речовини  $S$  і час сушки  $\tau$ .

Інтенсифікація процесу теплопередачі від теплоносія до матеріалу здійснюється організацією киплячого шару.

У ході експериментальних досліджень проводилася сушка матеріалу в псевдозрідженому шарі з різними способами передачі теплоти:

- без підведення стороннього теплоносія;
- передача теплоти від теплого повітря, нагрітого в змішувачу, при спалюванні біогазу в виносній топці за допомогою інжекційного пальника;
- передача теплоти від теплоносія, отриманого безпосередньо в топковій частині сушилки при змішуванні холодного повітря з продуктами згорання біогазу в газогорілочному пристрої з примусовою подачею повітря.

У першому випадку сушка здійснювалася безпосередньо повітрям, що поступає з навколишнього середовища з температурою  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ , який подається для організації псевдозрідженого шару, без підведення стороннього теплоносія.

Такий метод сушки обраний для визначення можливості використання установки термічної сушки без витрат біогазу в літній період. Експеримент показав, що використання такого методу недоцільно, тому що час сушіння зростає в 2,5 рази, а вартість електроенергії, витраченої на привід дутьєвого пристрою, перевищує собівартість зекономленого біогазу.

Другий спосіб сушки здійснюється за рахунок теплого повітря, нагрітого в змішувачу, при спалюванні біогазу в виносній топці за допомогою інжекційної форсунки (рис. 3).

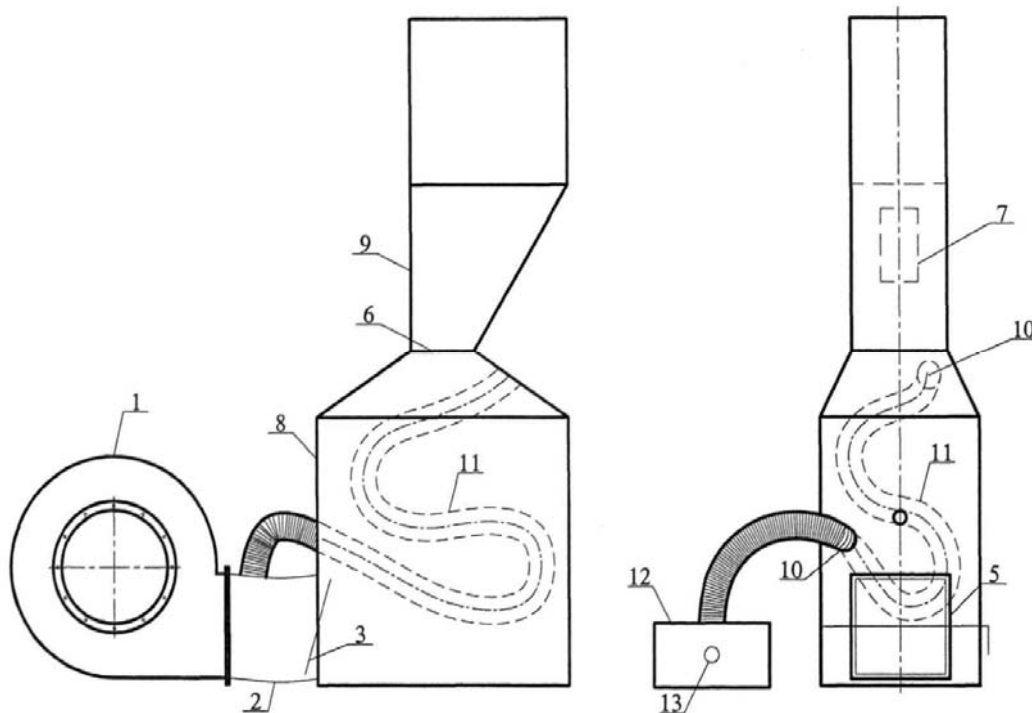


Рис. 3. Схема модифікованої експериментальної установки термічної сушки для дослідження процесу сушки матеріалу при передачі теплоти від повітря, нагрітого в змішувачу, при спалюванні біогазу в виносній топці за допомогою інжекційного пальника: 1 – дутьєвий пристрій; 2 – брезентовий повітропровід; 3 – шибер; 4 – отвір для кріплення пальника; 5 – отвір для подачі повітря; 6 – газорозподільна ґрати; 7 – завантажувально-розвантажувальний отвір; 8 – топкова камера; 9 – робоча камера; 10 – отвори для приєднання теплообмінника; 11 – гофрований теплообмінник; 12 – виносна топка; 13 – інжекційний пальник

Цей метод має ряд переваг:

- можливість використання інжекційного пальника для спалювання біогазу;
- отримання «сухого» теплоносія в теплообміннику за рахунок нагрівання повітря уходящими продуктами згорання.

Недоліками є:

- необхідність влаштування теплообмінника з великою площею теплообміну;
- підвищений гідравлічний опір сушарки;
- малий термін експлуатації виносної топки внаслідок відсутності тепловідведення від поверхні топки;
- високий температурний рівень у виносній топці при спалюванні біогазу, що сприяє інтенсивному синтезу оксидів вуглецю;
- низький коефіцієнт корисної дії теплообмінника ( $\eta = 60\text{--}70\%$ ) при оптимальній поверхні теплообміну.

Спосіб сушки з підведенням теплоносія, отриманого безпосередньо в топковій частині сушила (рис. 4) при змішуванні холодного повітря з продуктами згорання біогазу в газогорілочному пристрої з примусовою подачею повітря, дає найбільш прийнятну якість процесу. При цьому способі підведення теплоносія можливо плавне регулювання температурного режиму обробки матеріалу, спостерігається найбільша ступінь сухості речовини і менший час сушіння.

Основні показники по різним способам сушки наведені в табл. 5 і на рис. 5.

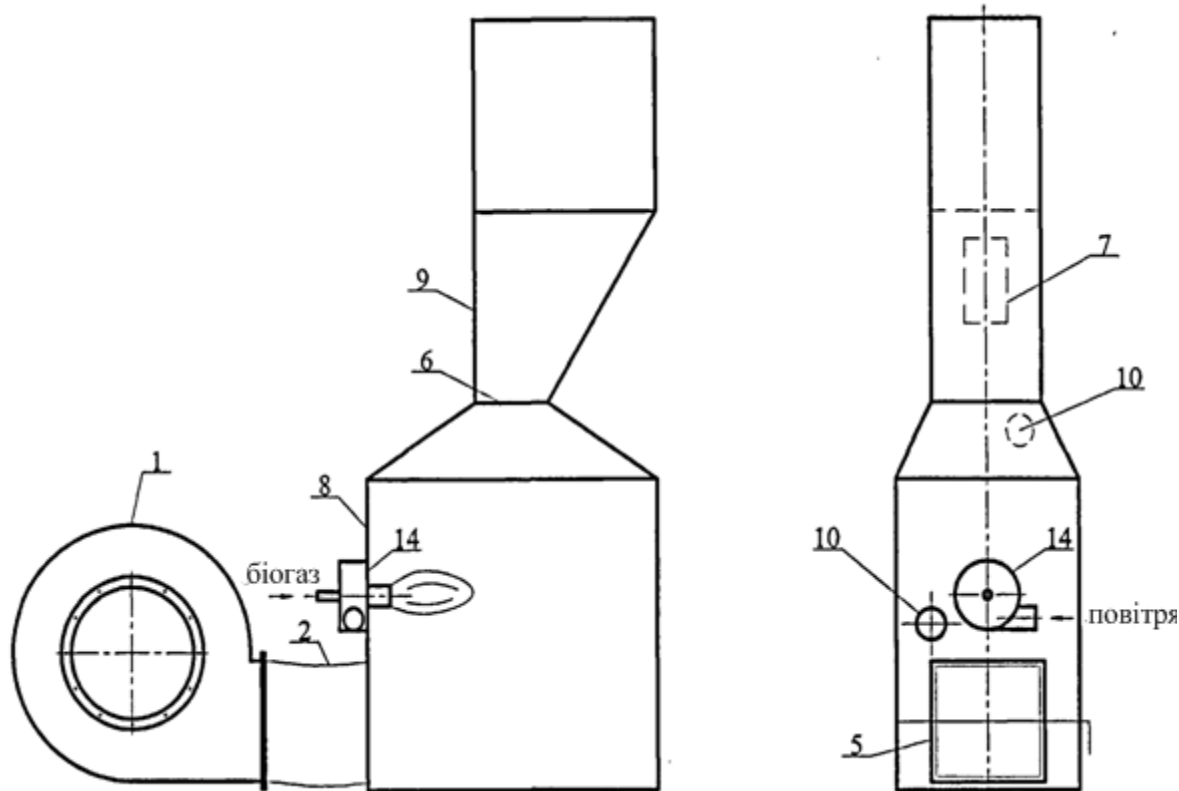


Рис. 4. Модифікована схема експериментальної установки термічної сушки для дослідження процесу сушки при передачі теплоти від теплоносія, отриманого при змішуванні холодного повітря з продуктами згорання від спалювання біогазу в газогорілочному пристрої з примусовою подачею повітря: 1 – дутьєвіе пристрій; 2 – брезентовий повітропровід; 3 – шибер; 4 – отвір для кріплення пальника; 5 – отвір для подачі повітря; 6 – газорозподільна ґрати; 7 – завантажувально-розвантажувальне отвір; 8 – топкова камера; 9 – робоча камера; 10 – отвори для приєднання теплообмінника; 14 – газогорілочний пристрій з примусовою подачею повітря



Таблиця 5

## Основні показники сушки

Параметри	Сушка повітрям без підводу стороннього теплоносія	Сушка повітрям, нагрітим в теплообміннику	Сушка повітрям, розбавленим продуктами згорання	Сушка інфрачервоним випромінюванням
Час сушки, хв	150	60	45	60
Маса вихідного матеріалу, кг	1,4	1,4	1,4	1,4
Витрати біогазу, м /год.	–	2,15	3,4	0,5
Енергетичний еквівалент біогазу, кВт	–	10,78	17	2,3
Витрати ел. енергії, кВт	1,5	1,5	1,5	–
Сумарна енергоємність, кВт	1,5	12,28	18,5	2,3
Питома енергоємність, МДж/кг сух. реч.	16,96	64,53	73,86	10,20
Продуктивність експериментальної установки, кг сух. реч./год.	0,3	0,7	0,9	0,8

Порівняльний аналіз методів сушки здійснюється за наступними показниками: сумарна енергоємність, кВт; питома енергоємність, МДж/ кг сухої речовини; продуктивність експериментальної установки, кг сухої речовини/год.

Експериментально встановлено, що сушка субстрату із застосуванням дутьєвого пальника забезпечує найбільшу швидкість сушіння. Це дозволяє скоротити час процесу, збільшити продуктивність сушарки, не збільшуючи його конструктивних розмірів. Питома енергоємність цього методу висока, але за рахунок використання біогазу, одержуваного в процесі анаеробної обробки відходів, можливе зниження експлуатаційних витрат.

Найменшу питому енергоємність має сушка інфрачервоним випромінюванням. Але цей метод має ряд недоліків:

- нерівномірність сушки по глибині шару;
- висока температура на поверхні сушимо матеріалу, що призводить до його спалаху і деструкції корисних органічних речовин;
- малі обсяги сушимо матеріалу, так як сушка повинна здійснюватись в тонкому шарі;
- трудомісткість завантаження і вивантаження матеріалу.

Сушку інфрачервоним випромінюванням можна застосовувати при обсягах оброблюваного матеріалу до 0,4 м<sup>3</sup>/добу з вологістю 60 %, що відповідає кількості відходів, що утворюються від 20 голів великої рогатої худоби або 35 голів свиней, що утримуються на тваринницькому підприємстві. Анаеробна обробка такої кількості відходів в біореакторах дозволяє отримувати до 2,5 м<sup>3</sup>/год. біогазу, що на 20 % більше, ніж необхідно для безперебійної роботи сушила протягом доби.

При зброджуванні біомаси від 20 і більше голів великої рогатої худоби доцільне застосування сушки в псевдозрідженому шарі з підведенням сушильного агента, отриманого при змішуванні холодного повітря з продуктами згорання біогазу. Спалювання здійснюється в газогорілочному пристрої з примусовою подачею повітря, безпосередньо в топковій частині сушила. Такий спосіб дозволяє обробляти більшу кількість відходів у більш компактній і практичній у використанні установці. Цей метод більш енергоємний, тому

кількість біогазу, що утворюється в процесі анаеробного зброджування, покриває лише 15–20 % усіх енерговитрат на сушку, що обумовлює залучення додаткового джерела енергії, яким може служити природний або зріджений газ, що підмішується до біогазу.

Необхідно пам'ятати, що при великих обсягах оброблюваного матеріалу ускладнюється конструкція сушильного пристрою, збільшуються розміри прийомного бункера і площа газорозподільчої решітки, що тягне за собою збільшення витрати металу та потрібної потужності повітрорудного пристрою. Випускаемі промисловістю типорозміри вентиляторів обмежують розміри і продуктивність сушила. Тому при великих обсягах висушуемого матеріалу необхідний пристрій декількох установок, періодичність роботи яких залежить від продуктивності біореакторів.

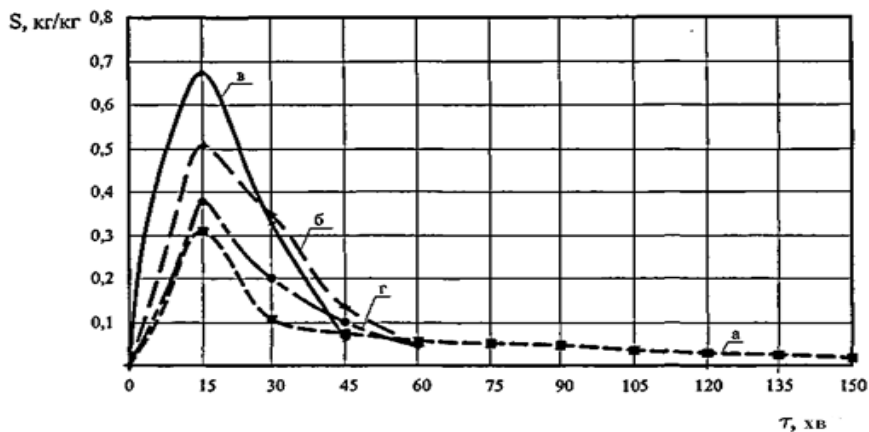


Рис. 5. Залежність ступеня сухості речовини від часу сушки при різних способах підведення теплоти: а – сушка повітрям; б – сушка повітрям, нагрітим в теплообміннику; в – сушка повітрям, розведеним продуктами згорання біогазу; г – сушка інфрачервоним випромінюванням

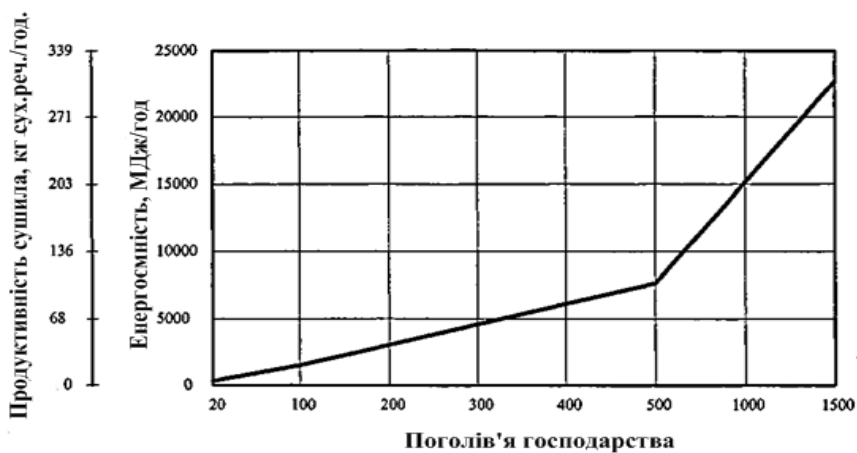


Рис. 6. Залежність продуктивності сушила і енергоємності сушки від поголів'я ВРХ

### Висновки

1. Встановлено, що найменший час сушки залишку анаеробної ферментації спостерігається при застосуванні сушки повітрям, розбавленим продуктами згорання біогазу. Найгірші показники спостерігаються при обробці матеріалу повітрям без залучення стороннього джерела енергії. Допустимими значеннями часу сушки, і ступеню сухості речовини володіє сушка повітрям, нагрітим в теплообміннику і сушка інфрачервоним випромінюванням.

2. Дослідження показали, що сушку інфрачервоним випромінюванням можна застосовувати при обсягах оброблюваного матеріалу до 0,4 м<sup>3</sup>/добу. з вологістю 60 %, що відповідає кількості відходів, що утворюються від 20 голів великої рогатої худоби або 35

голів свиней, що утримуються на тваринницькому підприємстві. Анаеробна обробка такої кількості відходів в біореакторах дозволяє отримувати до 2,5 м<sup>3</sup>/год. біогазу, що на 20 % більше ніж необхідно для безперебійної роботи сушила протягом доби.

3. При сушці інфрачервоним випромінюванням залишку анаеробної ферментації слід керуватися наступними параметрами:

- товщина шару не повинна перевищувати 45 мм, так як при збільшенні товщини відбувається недостатня обробка нижніх шарів матеріалу, при цьому верхні шари екранують випромінювання;
- діаметр гранул слід приймати не більше 15 мм;
- тепловий потік при інфрачервоній сушці залишку анаеробної ферментації не повинен перевищувати 70 кВт/м<sup>2</sup>, так як його збільшення призводить до обуглювання матеріалу і руйнуванню корисних органічних речовин.

4. При зброджуванні гною від 20 і більше голів великої рогатої худоби доцільне застосування сушки в псевдозрідженому шарі з підведенням сушильного агента, отриманого при змішуванні холодного повітря з продуктами згорання біогазу.

#### Список літератури

1. Эстеркин Р. И. Теплотехнические измерения при сжигании газового и жидкого топлива: Справочное руководство / Р. И. Эстеркин, А. С. Иссерлин, М. И. Певзнер. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Недра, 1981. – 424 с.
2. Майстренко О. Ю. Дослідження процесу спалювання біогазу в установках термічного сушіння / О. Ю. Майстренко, Ю. В. Куріс, Ю. С. Калінцева, // Фаховий журнал “Новини Енергетики”. м. Київ, – № 4. – 2010. – С. 15–25.
3. Майстренко О. Ю. Експериментальне дослідження процесу спалювання біогазу в установках термічного сушіння // О. Ю. Майстренко, Ю. В. Куріс, С. І. Ткаченко, Ю. С. Калінцева // Фаховий журнал «Промелектро». м. Київ, – № 2. – 2010. – С. 37–45.
4. Майстренко О. Ю. Розробка математичної моделі процесів розвитку мікроорганізмів в рамках біоенергетики біомаси / О. Ю. Майстренко, Ю. В. Куріс, Ю. С. Калінцева // Фаховий журнал “Новини Енергетики”. м. Київ, – № 2. – 2010. – С. 32–39.
5. Майстренко О. Ю. Розробка математичної моделі чисельного методу розрахунку використання енергії біомаси / О. Ю. Майстренко, Ю. В. Куріс, Ю. С. Калінцева // Фаховий журнал “Енергетика і електрифікація”. м. Київ, – № 2. – 2010. – С. 35–41.

### EXPERIMENTAL RESEARCH METHODS CART FOR INTENSIFICATION OF HEAT DRYING PROCESSES MATERIAL

Ju.V. KURIS, Cand. Tech. Sci., S. F. CHERVONIY, Dr. Sci. Tech.

Ju. S. KALINCEVA, The majster

*Found that the shortest time of drying anaerobic fermentation residue observed in the application of drying air, combustion products dilute gasses. The worst performance observed in the processing of materials by air without the involvement of foreign energy sources. Valid values of drying time and degree of dry matter has a drying air heated in the heat exchanger and drying infrared radiation.*

*When infrared radiation drying of anaerobic fermentation residue should be guided by the following parameters:*

- ▶ *thickness should not exceed 45 mm, as with increasing thickness is insufficient treatment of lower layers of material, while the upper layers of screening radiation;*
- ▶ *diameter of the granules should take no more than 15 mm;*
- ▶ *heat flow to the infrared drying anaerobic fermentation residue should not exceed 70 kilowatt/m<sup>2</sup>, as its increase leads to carbonization of the material and the destruction of useful organic compounds.*

*Поступила в редакцію 05.08 2010 г.*