

УДК 662.73:628.336.3

КІНЕТИКА ПРОЦЕСУ СУШІННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ БІОГРАНУЛ НА КОНВЕКТИВНОМУ СУШИЛЬНОМУ СТЕНДІ

Ж. О. Петрова,
член-кор. НАН України
bergelzhanna@ukr.net
ORCID: 0000-0001-7385-8495

В. М. Пазюк, д-р техн. наук
vadim_pazuk@ukr.net
ORCID: 0000-0002-4955-1941

Ю. П. Новікова, д-р філософії
yulianovikova3@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6705-1000

А. І. Петров, д-р філософії
monoton10@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4851-3115

Інститут технічної теплофізики
НАН України,
03057, Україна, м. Київ,
вул. Марії Капніст, 2а

На сьогодні в Україні існує така проблема, як переповнення мулових карт, до яких постійно додають активний мул, що з часом перетворюється на мулові відкладення. Крім того, накопичені мулові відкладення застарілі, через що вони втратили переважну кількість біогенних речовин, стали занадто мінералізованими й майже непридатними до безпосереднього одержання з них біопалива. Їх ліквідація потрібна для ефективної та безперебійної експлуатації очисних споруд, а також для рекультивзації земель. Однак для розв'язання цієї проблеми можна використовувати застарілі мулові відкладення при створенні палива на основі торфу та біомаси, що набуває актуальності через енергетичну кризу у всьому світі. Тому нині нагальним завданням є розробка технології переробки застарілих мулових відкладень на паливні гранули, які можуть використовуватися як паливо для, наприклад, міні-ТЕЦ, що одночасно виробляють теплову й електричну енергію. Зауважимо, що застарілі мулові відкладення мають малий вміст органічної складової, з огляду на це для кращої їх утилізації запропоновано створювати композитні гранули, а отримана при подальшому їх сушінні й спалюванні зола застосовуватиметься для виготовлення будівельних матеріалів. Метою роботи було проведення дослідження процесу сушіння композитних гранул на конвективному стенді й узагальнення результатів теоретичним розрахунком. У роботі вивчені процеси сушіння композиційних гранул на основі застарілих мулових відкладень, торфу й біомаси і визначені ефективні режими сушіння. Виявлено вплив температури теплоносія на тривалість сушіння мулоторф'яної композиції: підвищення температури зменшує тривалість сушіння гранул у 1,4 раза. Крім того, при порівнянні кінетики сушіння дво- і трикомпонентних гранул при температурі 80 °C та 120 °C встановлено, що тривалість сушіння трикомпонентних гранул в 1,1–1,4 раза менша, ніж у двокомпонентних, тобто підвищення температури теплоносія зменшує тривалість сушіння трикомпонентних гранул приблизно у 1,5 раза. Теоретичні дослідження, за підсумками яких побудовані узагальнені криві сушіння композиційних гранул, розраховані за допомогою методу В. В. Краснікова, показали збіг з експериментальними даними. З узагальнених кривих сушіння і швидкості сушіння розраховані відносні й кінетичні коефіцієнти сушіння, отримані формули тривалості сушіння дво- і трикомпонентних гранул.

Ключові слова: мулові відкладення, торф, біомаса, гранулювання, біогранули, сушіння.

Вступ

Для України актуальною проблемою нині є переповнення мулових карт, оскільки до них постійно додають активний мул, який з часом перетворюється на мулові відкладення. Мулові карти, або мулові майданчики, – це спеціально огорожені водонепроникними матеріалами земельні ділянки з герметичними днищами для зневоднення мулових відкладень за допомогою дренажу або природним шляхом. Відкладення після цього збираються, а ділянки можуть повторно використовуватися. Проте недотримання технологій часто призводить до забруднення навколишнього середовища. Наприклад, переповнені мулові карти негативно впливають на екологічну ситуацію в Україні, забруднюючи підземні води та ґрунти токсичними речовинами. Варто також згадати й про те, що недоліками мулових карт є їх вузькі можливості, що пояснюється необхідністю зупиняти роботи при температурі навколишнього середовища нижче точки замерзання води, тобто в зимовий період процеси переробки мулових відкладень ускладнюються [1].

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.
© Ж. О. Петрова, В. М. Пазюк, Ю. П. Новікова, А. І. Петров, 2025

Крім того, виникають проблеми й при переробці «застарілих» мулових відкладень, до яких належать ті, яким понад 30 років. Вказане пояснюється тим, що вони майже не мають органічної складової [2].

У роботі [2] наведено літературний огляд технологій переробки осаду стічних вод в Україні і світі. Однією з нових технологій є утилізація осаду шляхом застосування вермікультури, що знезаражує і збільшує ефективність очищення відкладень, зменшення скидання на мулові карти. Технологія полягає в переробці мулу за допомогою черв'яків, що здешевлює утилізацію порівняно зі зрошенням на полях.

Багато країн спалює активний мул із твердими побутовими відходами. Технологія полягає в сушінні композиції на основі твердих побутових відходів і мулових відкладень, які спалюють у спеціальних печах. Проте при використанні цієї технології виникає інша проблема, йдеться про високі енергетичні витрати на сушіння активного мулу з високою вологістю. Нині ефективним способом знезараження і переробки відкладень визнається технологія обробки відкладень у біогазових установках, яка полягає у змішуванні підігрітого сирого мулу зі збродженим осадом у відношенні 1:10. Завдяки цьому отримуються біогаз й екологічні добрива [2].

У роботі [3] представлено дослідження зі створення з активного мулу цементу. Виробництво цементу здійснювалося із золи після спалювання активного мулу, як заміни шлакового цементу, що з економічної точки зору є дуже вигідно. Використання золи шламу стічних вод дозволить отримати згадану комерційну вигоду й екологічну підтримку, яку забезпечують два заводи.

При переробці активного мулу популярним для створення біогазу є його анаеробне розкладання [4–9] як зріла технологія, що дозволяє ефективно й економічно утилізувати відходи біомаси. Вона викликала широкий інтерес, оскільки генерує біогаз (CH_4 і CO_2 , а також мікрогази, включаючи сірководень, водень і азот, серед інших), шляхом переробки органічних відходів, що зменшує забруднення навколишнього середовища [4, 10, 11].

В останні роки тенденції в управлінні довкіллям еволюціонували від ліквідації відходів до їх переробки й утилізації в контексті циркулярної економіки [12, 13]. Багато процесів утилізації відходів спрямовано на повне окислення осаду, тобто вироблення головним чином біопалива [14, 15]. Однак такий підхід призводить до втрати продуктів із доданою вартістю, присутніх в осаді, оскільки він переважно складається з бактерій та інших мікроорганізмів [12]. Саме тому відходи з відходів вважаються чудовим джерелом продуктів біопереробки [16–19]. Для створення таких біопродуктів потрібне контрольоване руйнування біологічних структур. Менш агресивні процеси солубілізації дозволяють вивільняти до рідких середовищ ферменти [20–23], біопластики [24, 25], білки [26, 27], гумінові кислоти [27, 28] і ліпіди [29–31]. Використання водно-акумулятивної обробки шляхом відновлення таких біосполук, як білки, ферменти, гумінові кислоти, ліпіди або коротколанцюгові жирні кислоти, з точки зору економіки видається цікавим.

Проте більша частина технологій у світі та тих, які наведені у роботі, застосовують для переробки активного мулу.

Метою роботи є дослідження процесу сушіння композитних гранул на конвективному стенді й узагальнення теоретичним розрахунком.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання: вивчення процесу сушіння композиційної сировини на основі торфу, застарілих мулових відкладень і біомаси; узагальнення експериментальних даних із теоретичним розрахунком, розрахунок відносних і кінетичних коефіцієнтів сушіння, отримання формул тривалості сушіння дво- і трикомпонентних гранул.

Матеріали та методи

Дво- і трикомпонентні композиції для гранулювання створювали із застарілих мулових відкладень, фрезерного торфу і біомаси [32] і піддавали їх гранулюванню на шнековому механічному пристрої. Після формування на конвективному сушильному стенді, який дозволяє проводити термічну обробку сушильним агентом при температурі 30–50 °C та швидкості руху 0,5–5 м/с [33], досліджувалася кінетика сушіння гранул.

Результати досліджень

На рис. 1 представлені температурні криві й кінетика сушіння мулоторф'яних гранул (у порції 50% мулу / 50% торфу) на конвективному сушильному стенді при температурах 80 °C і 120 °C.

Тривалість сушіння мулоторф'яних гранул із підвищенням температури теплоносія від 80 до 120 °С зменшується на 29,5% (рис. 1). При вологості гранул 10% температура в них становить 72 °С. Їх нагрівання при температурі теплоносія 80 °С проходить рівномірно. При температурі 120 °С нагрівання гранул відбувається інтенсивніше і при відповідній вологості температура в них дорівнює 115 °С.

Швидкість сушіння мулоторф'яних гранул із підвищенням температури від 80 до 120 °С зростає від 3,8 до 5,5 %/хв. (рис. 2).

Досліджено також сушіння трикомпонентних гранул після гранулювання на шнековому пресі із включення до мулоторф'яної суміші 10% тирси або 10% гречаної лузги.

Трикомпонентні гранули сушаться швидше на 13–25% порівняно з двокомпонентними на основі мула й торфу (рис. 3).

Аналогічно проводимо сушіння дво- і трикомпонентних гранул при температурі теплоносія 80 °С (рис. 4).

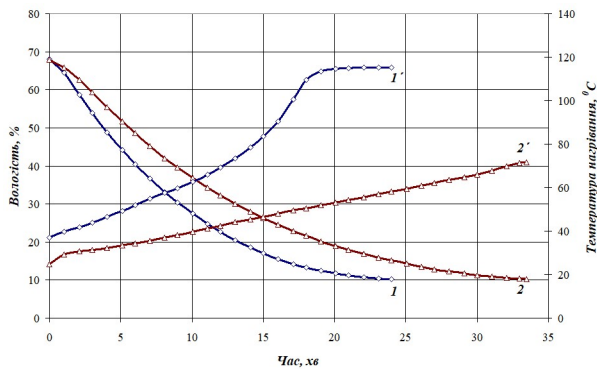


Рис. 1. Зміна температури в середині гранули (1', 2') і вологості (1, 2) мулоторф'яних гранул у пропорції 50% мулу / 50% торфу при швидкості теплоносія 2 м/с, діаметрі гранул 6 мм:
1, 1' – 120 °C; 2, 2' – 80 °C

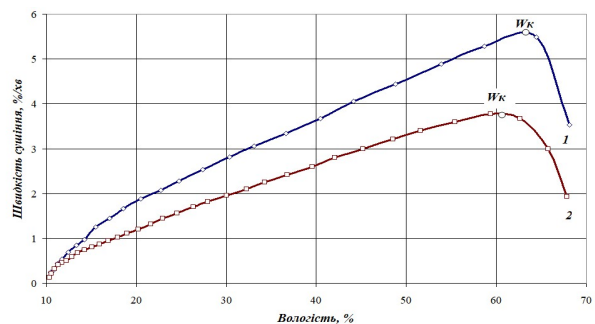


Рис. 2. Зміна швидкості сушіння мулоторф'яних гранул у пропорції 50% мулу / 50% торфу при швидкості теплоносія 2 м/с, діаметрі гранул 6 мм:
1 – 120 °C; 2 – 80 °C

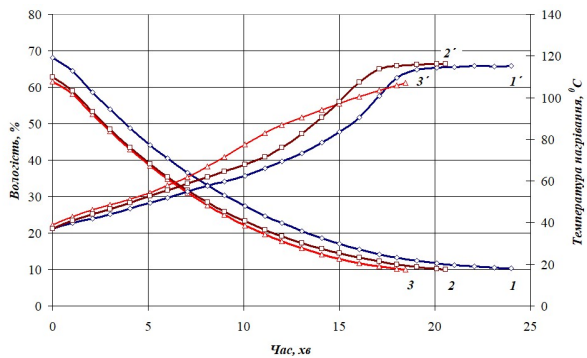


Рис. 3. Зміна температури в середині гранули (1', 2', 3') та вологості (1, 2, 3) дво- і трикомпонентних гранул при температурі теплоносія 120 °C, швидкості теплоносія 2 м/с, діаметрі гранул 6 мм:
1, 1' – двокомпонентні гранули у пропорції 50% мулу / 50% торфу;
2, 2' – трикомпонентні гранули у пропорції 45% мулу / 45% торфу / 10% гречаної лузги;
3, 3' – трикомпонентні гранули у пропорції 45% мулу / 45% торфу / 10% тирси

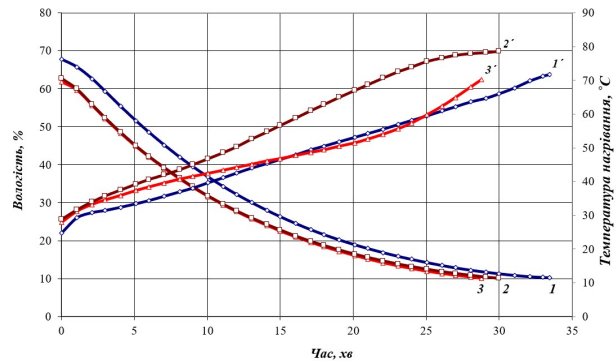


Рис. 4. Зміна температури в середині гранули (1', 2', 3') та вологості (1, 2, 3) дво- та трикомпонентних гранул при температурі теплоносія 80 °C, швидкості теплоносія 2 м/с, діаметрі гранул 6 мм:
1, 1' – двокомпонентні гранули у пропорції 50% мулу / 50% торфу;
2, 2' – трикомпонентні гранули у пропорції 45% мулу / 45% торфу / 10% гречаної лузги;
3, 3' – трикомпонентні гранули у пропорції 45% мулу / 45% торфу / 10% тирси

Встановлено, що сушіння трикомпонентних сумішей при температурі теплоносія 80°C прискорює процес на 10–16%. У трикомпонентних гранулах 45% мулу / 45% торфу / 10% гречаної лузги спостерігається найвища температура прогрівання, вона дорівнює $78,7^\circ\text{C}$, для трикомпонентних гранул 45% мулу / 45% торфу / 10% тирси зафіксовано найменшу температуру прогрівання – це $70,3^\circ\text{C}$.

На основі проведених досліджень визначено, що додавання тирси або лузги гречки як органічної складової зменшує тривалість сушіння (рис. 4) і підвищує швидкість сушіння (рис. 5).

На рис. 5 представлено залежність швидкості сушіння від вологості дво- і трикомпонентних гранул. Так, у двокомпонентних мулоторф'яних гранул швидкість сушіння в критичній точці W_k нижча, ніж у трикомпонентних гранул і становить $3,8\%/xв$. У свою чергу, у трикомпонентних гранулах у критичній точці W_k швидкість сушіння дорівнює $4\%/xв$, що вище на $0,2\%$. При вологості гранул 42% швидкості сушіння дво- і трикомпонентних гранул співпадають.

Встановлено, що характер процесу сушіння, як впливає кривих кінетики сушіння, швидкості сушіння й температурних кривих, визначається фізико-хімічними і структурно-механічними властивостями матеріалу, що впливають на форму зв'язку вологи з ним, дифузійною природою явища, а також способом підведення теплоти – закономірністю взаємодії тіла з навколишнім середовищем. Різноманітність факторів і їх взаємозв'язок ускладнює отримання аналітичних залежностей кінетики сушіння матеріалу. Отже, при описанні процесу сушіння використовують емпіричні залежності. Найбільш схожим методом розрахунку кінетики сушіння є метод, заснований на вивченні загальних закономірностей процесу, що наближає теорію і практику сушіння [34, 35].

Процес сушіння описується кривими сушіння, які характеризують зміну середньої (інтегральної) вологості матеріалу W під час сушіння τ [36], і кривими швидкості сушіння, що будуються методом графічного диференціювання за кривими сушіння [36].

На кривих сушіння виділяють дві основні ділянки, відокремлені вертикальною лінією: перший період – період сталої швидкості; другий – період спадної швидкості. Ці ділянки розділяються критичним вологовмістом (W_k), який визначається по точці злому прямої (першого періоду) [37].

Для порівняння експериментальних результатів і теоретичних розрахунків виконано тепловологообмін. Для розрахунку кінетики тепловологообміну при сушінні композиційних гранул використано метод В. В. Краснікова [34, 35].

Для дослідження кінетики сушіння взяті композиційні гранули на основі мулу й торфу у пропорції 50% мулу / 50% торфу, гранули з додаванням до них 10% тирси у пропорції 45% мулу / 45% торфу / 10% тирси і з додаванням 10% гречаної лузги 45% мулу / 45% торфу / 10% гречаної лузги.

Для визначення відносних коефіцієнтів сушіння створених композиційних гранул будуюмо узагальнені криві сушіння в системі напівлогарифмічних координатах $\lg W$ залежно від часу проведення дослідів τ (рис. 6).

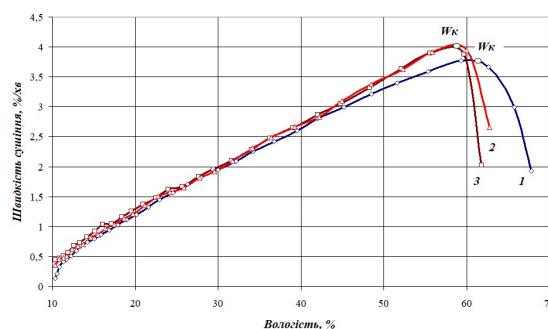


Рис. 5. Зміна швидкості сушіння дво- і трикомпонентних гранул при температурі теплоносія 80°C , швидкості теплоносія 2 м/с , діаметрі гранул 6 мм :

- 1 – двокомпонентні гранули у пропорції 50% мулу / 50% торфу;
- 2 – трикомпонентні гранули у пропорції 45% мулу / 45% торфу / 10% гречаної лузги;
- 3 – трикомпонентні гранули у пропорції 45% мулу / 45% торфу / 10% тирси

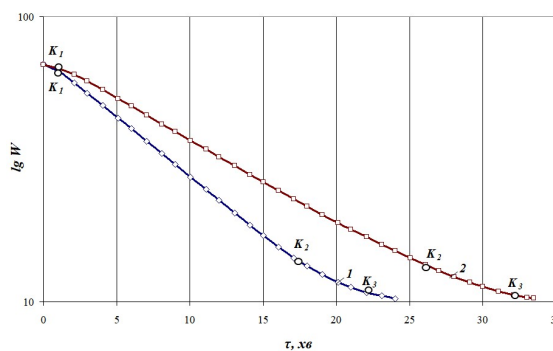


Рис. 6. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння мулоторф'яних гранул у пропорції 50% мулу / 50% торфу в напівлогарифмічній системі координат при швидкості теплоносія 2 м/с :

- 1 – 120°C ; 2 – 80°C

Представлені криві сушіння мулоторф'яних гранул у напівлогарифмічних координатах на рис. 6 вказують на те, що другий період складається з трьох частин із критичними точками K_1 , K_2 та K_3 . Як видно на рисунку, чим менша температура теплоносія, тим значення критичних точок настає пізніше і процес проходить повільніше.

Аналогічно будуємо узагальнені криві сушіння в напівлогарифмічній системі координат $\lg W$ залежно від часу проведення дослідів τ для трикомпонентних гранул (рис. 7–8).

Представлені криві сушіння композиційних трикомпонентних гранул у напівлогарифмічних координатах на рис. 7 та 8 вказують на те, що другий період складається з двох частин із критичними точками K_1 та K_2 . Крім того, з'ясовано, що чим менша температура теплоносія, тим значення критичних точок настає пізніше і процес проходить повільніше.

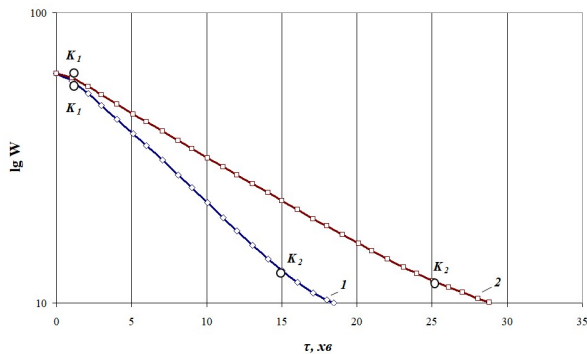


Рис. 7. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння трикомпонентної гранули у пропорції 45% мулу / 45% торфу / 10% тирси в напівлогарифмічній системі координат при швидкості теплоносія 2 м/с: 1 – 120 °C; 2 – 80 °C

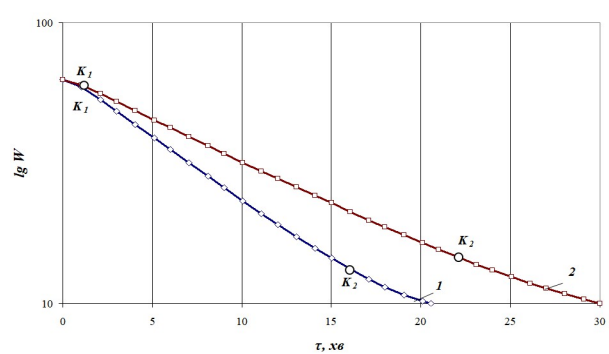


Рис. 8. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння трикомпонентної гранули у пропорції 45% мулу / 45% торфу / 10% зречаної лузги в напівлогарифмічній системі координат при швидкості теплоносія 2 м/с: 1 – 120 °C; 2 – 80 °C

При математичному описанні кінетики вологообміну при сушінні в другому періоді повинні враховуватися величини, вірніше, емпіричні коефіцієнти, зумовлені властивостями даного матеріалу. Дані коефіцієнти слід визначати безпосередньо з дослідів. Відносний коефіцієнт сушіння χ обчислюється лише за формулою зв'язку вологи з матеріалом, його структурою, щільністю і не залежить від режиму обробки.

Величини відносних коефіцієнтів сушіння композиційних гранул у другому періоді встановлюємо з рис. 6 на прикладі режиму 1, які дорівнюють [6]

$$\chi_1 = \frac{\lg W_{K_1} - \lg W_{K_2}}{N\tau_1} = \frac{\lg 64,4 - \lg 14,2}{5,48 \cdot 16} \approx 0,008;$$

$$\chi_2 = \frac{\lg W_{K_2} - \lg W_{K_3}}{N\tau_2} = \frac{\lg 14,2 - \lg 11,24}{5,48 \cdot 4} \approx 0,005;$$

$$\chi_3 = \frac{\lg W_{K_3} - \lg W_K}{N\tau_3} = \frac{\lg 11,24 - \lg 10,26}{5,48 \cdot 2} \approx 0,004.$$

Розрахуємо кінетичні коефіцієнти сушіння у другому періоді композиційних гранул для режиму 1 на рис. 6 на прикладі режиму 1 [6]

$$K_1 = \chi_1 \cdot N = 0,008 \cdot 5,48 \approx 0,044 \text{ хв}^{-1};$$

$$K_2 = \chi_2 \cdot N = 0,005 \cdot 5,48 \approx 0,027 \text{ хв}^{-1};$$

$$K_3 = \chi_3 \cdot N = 0,004 \cdot 5,48 \approx 0,022 \text{ хв}^{-1}.$$

Всі розрахунки коефіцієнтів сушіння зводимо в табл. 1 та 2.

Таблиця 1. Відносні й кінетичні коефіцієнти сушіння двокомпозиційних гранул (мулоторф'яних)

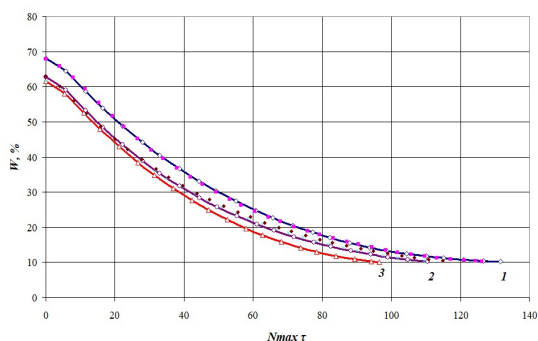
№	Назва гранул	Діапазон критичних вологості, %	Відносні коефіцієнти сушіння			Кінетичні коефіцієнти сушіння		
			χ_1	χ_2	χ_3	K_1	K_2	K_3
1	Мулоторф'яні гранули 50% мулу / 50% торфу Режим 1 ($t=120^\circ\text{C}$, $V=1,5$ м/с)	64,4 – 14,2	0,008			0,044		-
		14,2 – 11,2		0,005			0,027	
		11,2 – 10,2			0,004			0,022
2	Мулоторф'яні гранули 50% мулу / 50% торфу Режим 2 ($t=80^\circ\text{C}$, $V=1,5$ м/с)	65,8 – 13,5	0,007			0,026		
		13,5 – 10,54		0,005			0,019	
		10,54 – 10,29			0,013			0,049

Таблиця 2. Відносні й кінетичні коефіцієнти сушіння трикомпонентних гранул (мулоторф'яних + тирса або мулоторф'яних + лузга)

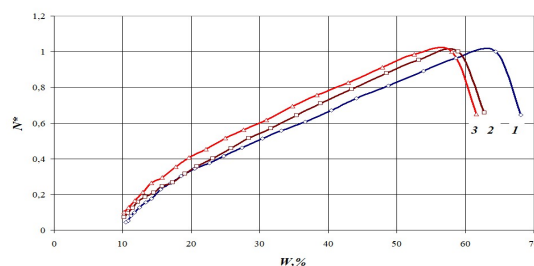
№	Назва гранул	Діапазон критичних вологості, %	Відносні коефіцієнти сушіння		Кінетичні коефіцієнти сушіння	
			χ_1	χ_2	K_1	K_2
1	Мулоторф'яні гранули + гречана лузга 45% мулу / 45% торфу / 10% гречаної лузги Режим 1 ($t=120^\circ\text{C}$, $V=1,5$ м/с)	58,9 – 13,3	0,010		0,043	
		13,3 – 10,2		0,005		0,028
2	Мулоторф'яні гранули + гречана лузга 45% мулу / 45% торфу / 10% гречаної лузги Режим 2 ($t=80^\circ\text{C}$, $V=1,5$ м/с)	60,0 – 14,6	0,007		0,029	
		14,6 – 10,0		0,005		0,021
3	Мулоторф'яні гранули + тирса 45% мулу / 45% торфу / 10% тирси Режим 1 ($t=120^\circ\text{C}$, $V=1,5$ м/с)	58,1 – 11,8	0,009		0,047	
		11,8 – 10,0		0,044		0,240
4	Мулоторф'яні гранули + тирса 45% мулу / 45% торфу / 10% тирси Режим 2 ($t=80^\circ\text{C}$, $V=1,5$ м/с)	59,7 – 14,2	0,008		0,031	
		14,2 – 10,1		0,005		0,020

Залежно від діапазону між критичними точками змінюються відносні й кінетичні коефіцієнти сушіння. У режимі 1, що відповідає температурі теплоносія 120°C , відносні коефіцієнти вищі, ніж в режимі 2 при температурі теплоносія 80°C (табл. 1, 2).

На рис. 9 представлені узагальнені криві швидкості сушіння в системі координат вологості W з узагальненою зміною або узагальненим часом сушіння $N_{\max} \cdot \tau$. Проводячи аналіз узагальнених кривих сушіння, можна сказати, що всі режими лягають на одну криву із похибкою не більше 10% (рис. 9). За комплексом $N_{\max} \cdot \tau$ найшвидше процес відбувається при сушінні трикомпонентних гранул у пропорції 45% мулу / 45% торфу / 10% тирси.

Рис. 9. Узагальнені криві сушіння композиційних гранул в системі координат $W - N_{\max} \cdot \tau$:

- 1 – мулоторф'яні гранули у пропорції 50% мулу / 50% торфу;
- 2 – трикомпонентні гранули у пропорції 45% мулу / 45% торфу / 10% гречаної лузги;
- 3 – трикомпонентні гранули у пропорції 45% мулу / 45% торфу / 10% тирси

Рис. 10. Узагальнені криві швидкості сушіння (N^*) композиційних гранул:

- 1 – мулоторф'яні гранули у пропорції 50% мулу / 50% торфу;
- 2 – трикомпонентні гранули у пропорції 45% мулу / 45% торфу / 10% гречаної лузги;
- 3 – трикомпонентні гранули у пропорції 45% мулу / 45% торфу / 10% тирси

Проводячи графічне диференціювання узагальненої кривої кінетики сушіння, представленої на рис. 9, отримали узагальнену криву швидкості сушіння композиційних гранул, зображену на рис. 10.

Загальна тривалість процесу сушіння τ_T (без врахування періоду прогріву) складається з тривалості сушіння в першому періоді τ_I , в 1-й τ_1 , 2-й τ_2 і 3-й τ_3 частинах другого періоду

$$\tau_T = \tau_I + \tau_1 + \tau_2 + \tau_3. \quad (1)$$

З огляду на те, що першого періоду сушіння при сушінні гранул не спостерігається, формула (1) набуває виду

$$\tau_T = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3.$$

Тривалість сушіння в 1-й частині другого періоду

$$\tau_1 = \frac{1}{\chi_1 N} \lg \frac{W_{K_1}}{W_{K_2}}.$$

Тривалість сушіння в 2-й частині другого періоду

$$\tau_2 = \frac{1}{\chi_2 N} \lg \frac{W_{K_2}}{W_{K_3}}.$$

Тривалість сушіння в 3-й частині другого періоду

$$\tau_3 = \frac{1}{\chi_3 N} \lg \frac{W_{K_3}}{W_K}.$$

Загальна тривалість процесу

$$\tau_T = \frac{1}{N} \left(\frac{1}{\chi_1} \lg \frac{W_{K_1}}{W_{K_2}} + \frac{1}{\chi_2} \lg \frac{W_{K_2}}{W_{K_3}} + \frac{1}{\chi_3} \lg \frac{W_{K_3}}{W_K} \right)$$

Загальна тривалість сушіння гранул розрахована і зведена в табл. 3 [4].

Таблиця 3. Тривалість процесу сушіння композитних гранул

№	Назва композитних гранул	Розрахункова тривалість процесу сушіння, хв
1	Мулоторф'яні (50% мулу / 50% торфу)	$\tau_T = \frac{112,47}{N}$
2	Мулоторф'яні з додавання гречаної лузги (45% мулу / 45% торфу / 10% гречаної лузги)	$\tau_T = \frac{86}{N}$
3	Мулоторф'яні з додавання тирси (45% мулу / 45% торфу / 10% тирси)	$\tau_T = \frac{78,4}{N}$

Висновки

1. Досліджено процеси сушіння композиційних гранул на основі застарілих мулових відкладень, торфу й біомаси, встановлено ефективні режими сушіння.

2. Визначено й узагальнено кінетичні закономірності конвективного сушіння дво- і трикомпонентних гранульованих композицій.

3. З узагальнених кривих сушіння і швидкості сушіння розраховані відносні й кінетичні коефіцієнти сушіння, отримані формули тривалості сушіння дво- і трикомпонентних гранул.

Література

- Муловий майданчик: пат. 27951 Україна: МПК (2006) C02F 11/00. u200705576, заяв. 21.05.2007, опубл. 26.11.2007.
- Снежкін Ю. Ф., Петрова Ж. О., Пазюк В. М., Новикова Ю. П. Стан технологій очищення стічних вод в Україні та світі. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2021. Т. 43. № 1. С. 5–12. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.1>.
- Kamyab Moghadas B., Fallah Fard H., Ghasemi M. Analyzing and reusing industrial wastewater sludge in cement production: Environmental and economic implications. *Results in Chemistry*. 2025. Vol. 16. Article 102299. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102299>.
- Salazar-Batres K. J., Moreno-Andrade I. Review of the effects of trace metal concentrations on the anaerobic digestion of organic solid waste. *BioEnergy Research*. 2025. Vol. 18. Article 24. <https://doi.org/10.1007/s12155-025-10826-y>.

5. Zandvoort M. H., van Hullebusch E. D., Gieteling J., Lens P. N. L. Granular sludge in full-scale anaerobic bioreactors: trace element content and deficiencies. *Enzyme and Microbial Technology*. 2006. Vol. 39. Iss. 2. P. 337–346. <https://doi.org/10.1016/j.enzmitec.2006.03.034>.
6. Zhang Y., Feng Y., Yu Q., Xu Z., Quan X. Enhanced high-solids anaerobic digestion of waste activated sludge by the addition of scrap iron. *Bioresour Technology*. 2014. Vol. 159. P. 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.114>.
7. Agani I. C., Suanon F., Biaou D., Yovo F., Tométin L. A. S., Mama D., Azandegbe E. C. Biogas recovery from sewage sludge during anaerobic digestion process: effect of iron powder on methane yield. *International Research Journal of Environment Science*. 2016. Vol. 5 (1). P. 7–12.
8. Gran S, Motiee H, Mehrdadi N, Tizghadam M. Impact of metal oxide nanoparticles (NiO, CoO and Fe₃O₄) on the anaerobic digestion of sewage sludge. *Waste and Biomass Valorization*. 2022. Vol. 13. P. 4549–4563. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01816-8>.
9. Linville J. L., Shen Y., Schoene R. P., Nguyen M., Urgun-Demirtas M., Snyder S. W. Impact of trace element additives on anaerobic digestion of sewage sludge with in-situ carbon dioxide sequestration. *Process Biochemistry*. 2016. Vol. 51. Iss. 9. P. 1283–1289. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.06.003>.
10. An J., Yun S., Wang W., Wang K., Ke T., Liu J., Liu L., Gao Y., Zhang X. Enhanced methane production in anaerobic co-digestion systems with modified black phosphorus. *Bioresour Technology*. 2023. Vol. 368. Article 128311. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128311>.
11. Liu L., Yun S., Ke T., Wang K., An J., Liu J. Dual utilization of aloe peel: aloe peel-derived carbon quantum dots enhanced anaerobic co-digestion of aloe peel. *Waste Management*. 2023. Vol. 159. P. 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.01.036>.
12. Núñez D., Oulego P., Collado S., Riera F. A., Díaz M. Separation and purification techniques for the recovery of added-value biocompounds from waste activated sludge. A review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2022. Vol. 182. Article 106327. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106327>.
13. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N. M. P., Hultink E. J. The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 143. P. 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>.
14. Bharathiraja B., Yogendran D., Ranjith Kumar R., Chakravarthy M., Palani S. Biofuels from sewage sludge – A review. *International Journal of ChemTech Research*. 2014. Vol. 6. No. 9. P. 4417–4427.
15. Zhao P., Shen Y., Ge S., Yoshikawa K. Energy recycling from sewage sludge by producing solid biofuel with hydrothermal carbonization. *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 78. P. 815–821. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.026>.
16. Raheem A., Sikarwar V. S., He J., Dastyar W., Dionysiou D. D., Wang W., Zhao M. Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. *Chemical Engineering Journal*. 2018. Vol. 337. P. 616–641. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.149>.
17. García M., Urrea J. L., Collado S., Oulego P., Díaz M. Protein recovery from solubilized sludge by hydrothermal treatments. *Waste Management*. 2017. Vol. 67. P. 278–287. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.051>.
18. Li H., Li Y., Li C. Characterization of humic acids and fulvic acids derived from sewage sludge. *Asian Journal of Chemistry*. 2013. Vol. 25. No. 18. P. 10087–10091. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2013.15162>.
19. Suárez-Iglesias O., Urrea J. L., Oulego P., Collado S., Díaz M. Valuable compounds from sewage sludge by thermal hydrolysis and wet oxidation. A review. *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 584–585. P. 921–934. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.140>.
20. Karn S. K., Kumar A. Protease, lipase and amylase extraction and optimization from activated sludge of pulp and paper industry. *Indian Journal of Experimental Biology*. 2019. Vol. 57. P. 201–205.
21. Nabarlaz D., Stüber F., Font J., Fortuny A., Fabregat A., Bengoa C. Activated sludge characterization: Extraction and identification of hydrolytic enzymes. *Water Production and Wastewater Treatment*. Nova Science Publishers, Inc., 2011. P. 11–26.
22. Nabarlaz D., Vondrysova J., Jenicek P., Stüber F., Font J., Fortuny A., Fabregat A., Bengoa C. Hydrolytic enzymes in activated sludge: Extraction of protease and lipase by stirring and ultrasonication. *Ultrasonics sonochemistry*. 2010. Vol. 17. Iss. 5. P. 923–931. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.02.006>.
23. Ni H., Fan X. M., Guo H. N., Liang J. H., Li Q. R., Yang L., Li H., Li H. H. Comprehensive utilization of activated sludge for the preparation of hydrolytic enzymes, polyhydroxyalkanoates, and water-retaining organic fertilizer. *Preparative Biochemistry and Biotechnology*. 2017. Vol. 47. Iss. 6. P. 611–618. <https://doi.org/10.1080/10826068.2017.1286599>.
24. Chen J. From waste to treasure: turning activated sludge into bioplastic poly-3-hydroxybutyrate. *Chinese Journal of Biotechnology*. 2017. Vol. 33. Iss. 12. P. 1934–1944. <https://doi.org/10.13345/j.cjb.170391>.
25. Pittmann T. U., Steinmetz H. Polyhydroxyalkanoate production as a side stream process on a municipal waste water treatment plant. *Bioresour Technology*. 2014. Vol. 167. P. 297–302. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.06.037>.

26. Jimenez J., Vedrenne F., Denis C., Mottet A., Délérís S., Steyer J. P., Rivero J. A. C. A statistical comparison of protein and carbohydrate characterisation methodology applied on sewage sludge samples. *Water Research*. 2013. Vol. 47. Iss. 5. P. 1751–1762. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.11.052>.
27. Wei L., Wang K., Kong X., Liu G., Cui S., Zhao Q., Cui F. Application of ultra-sonication, acid precipitation and membrane filtration for co-recovery of protein and humic acid from sewage sludge. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. 2016. Vol. 10. P. 327–335. <https://doi.org/10.1007/s11783-014-0763-9>.
28. Li H., Li Y., Jin Y., Zou S., Li C. Recovery of sludge humic acids with alkaline pretreatment and its impact on subsequent anaerobic digestion. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2014. Vol. 89. Iss. 5. P. 707–713. <https://doi.org/10.1002/jctb.4173>.
29. Dong Y., Zhu F. F., Zhang R. Y., Zhang D. R., Wang P., Chen B. L. Preliminary study on extraction and purification of ceramide in sewage sludge. *China Environmental Science*. 2019. Vol. 39. Iss. 5. P. 2063–2070.
30. Olkiewicz M., Caporgno M. P., Fortuny A., Stüber F., Fabregat A., Font J., Bengoa C. Direct liquid–liquid extraction of lipid from municipal sewage sludge for biodiesel production. *Fuel Processing Technology*. 2014. Vol. 128. P. 331–338. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.07.041>.
31. Revellame E. D., Hernandez R., French W., Holmes W. E., Benson T. J., Pham P. J., Forks A., Callahan II R. Lipid storage compounds in raw activated sludge microorganisms for biofuels and oleochemicals production. *RSC Advances*. 2012. Vol. 2. Iss. 5. P. 2015–2031. <https://doi.org/10.1039/C2RA01078J>.
32. Петрова Ж. О., Новикова Ю. П. Підготовка сировини, створення композицій та гранулоутворення з застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси. *Кераміка: наука і життя*. 2021. Т. 50. № 1. С. 14–18. <https://doi.org/10.26909/csl.1.2021.2>.
33. Петрова Ж. А., Слободянюк Е. С. Энергоэффективные режимы сушки коллоидных капиллярно-пористых материалов. *Инженерно-физический журнал*. 2019. Т. 92. № 5. С. 2269–2276.
34. Petrova Zh. A., Slobodyanyuk E. S. Energy-efficient modes of drying of colloidal capillary-porous materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2019. Vol. 92. Iss. 5. P. 1231–1238. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-02038-x>.
35. Петрова Ж. О., Снежкін Ю. Ф. Энергоэффективні теплотехнології переробки функціональної сировини. Київ: Наукова думка, 2018. 192 с.
36. Снежкін Ю. Ф., Пазюк В. М., Петрова Ж. О., Чалаєв Д. М. Теплонасосна зерносушарка для насінневого зерна. Київ: ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2012. 154 с.
37. Ткаченко С. Й., Співак О. Ю. Сушильні процеси та установки: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2007. 76 с.
38. Погожих М. І., Потапов В. О., Пак А. О., Жеребкін М. В. Энергоэффективні технології та техніка сушіння харчової сировини: навчальний посібник. Харків: ХДУХТ, 2016. 234 с.

Надійшла до редакції 14.05.2025