

УДК 662.73, 628.336.3

Yurii Sniezhkin, Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Director of the Institute of Technical Thermophysics of the NASU
ORCID ID 0000-0001-7871-8774 *e-mail*: ittf_ntps@ukr.net

Zhanna Petrova, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Chief Researcher of the Department of Heat and Mass Transfer in Heat Technologies
ORCID ID 0000-0001-7385-8495 *e-mail*: bergelzhanna@ukr.net

Yuliia Novikova, graduate student, junior researcher of the Department of Heat and Mass Transfer in Heat Technologies
ORCID ID 0000-0002-6705-1000 *e-mail*: yulianovikova3@gmail.com

Anton Petrov, graduate student, junior researcher of the Department of Heat and Mass Transfer in Heat Technologies
ORCID ID 0000-0003-4851-3115 *e-mail*: monoton10@gmail.com

Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

WAYS OF DISPOSAL OF OBJECTIVE FUEL SEDIMENTS FOR FUEL

Abstract. *Accumulated sludge from sewage treatment plants in large cities is obsolete, due to which they have lost the vast majority of nutrients, become too mineralized and practically unsuitable for direct use as fertilizer.*

The research is devoted to the development of a unified approach to the efficient processing of sludge as a fuel with the addition of flammable fillers such as milling peat, buckwheat husk, wood waste (sawdust).

Identified factors influencing the energy efficiency of the processes of preparation of raw materials, drying and granulation of composite mixtures based on peat, obsolete sludge and biomass, which allowed to obtain quality pellets and briquettes. The problem of processing obsolete sludge is the low content of organic matter, excessive ash content and high humidity, so they are not suitable for incineration in its pure form and for agriculture. To reduce ash content, it is advisable to add biomass and peat to sludge and dry to reduce moisture.

The article presents studies of drying kinetics of composite granules based on peat, obsolete sludge and biomass on an experimental convective drying stand. The convective drying stand allows to carry out heat treatment of composite granules at a temperature of drying agent of 30–150°C and speed of movement of 0,5–5 m/s. A comparison of the drying time of the sludge-peat composition and its components is performed, which shows that during the drying of the composite granules the intensification of the drying process is observed.

The presented comparison of drying kinetics of two- and three-component granules shows the same nature of the drying curves and the drying time is in the range of 17–18 minutes. The optimal ratio of components for quality granulation is selected. Effective drying regimes of composite granules based on sludge, peat and biomass are determined. Equilibrium humidity of composite granules not exceeding standard fuel humidity is determined.

Key words: *obsolete sludge; peat; biomass; drying; pellets*

Ю.Ф. Снежкін, Ж.О. Петрова, Ю.П. Новікова, А.І. Петров

Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна

ШЛЯХИ УТИЛІЗАЦІЇ ЗАСТАРІЛИХ МУЛОВИХ ВІДКЛАДЕНЬ НА ПАЛИВО

Анотація. Накопичені мулові осади очисних споруд великих міст є застарілими, через це втратили переважну кількість біогенних речовин, стали занадто мінералізованими і практично непридатними до безпосереднього використання їх як добрива.

Дослідження присвячені розробці єдиного підходу до ефективної переробки мулових осадів як палива із додаванням до них займистих наповнювачів, таких як фрезерний торф, лузга гречки, відходи деревини (тирса).

Виявлені фактори впливу на енергоефективні показники процесів підготовки сировини, сушіння та гранулоутворення композиційних сумішей на основі торфу, застарілих мулових осадів та біомаси, що дозволило отримати якісні гранули та брикети.

Проблемою переробки застарілих мулових відкладень є малий вміст в них органічних речовин, перевищена зольність та висока вологість, тому вони не придатні для спалювання в чистому вигляді та для землеробства. Для зменшення зольності до мулових відкладень доцільно додавати біомасу та торф та підсушити для зменшення вологості.

У статті наведені дослідження кінетики сушіння композиційних гранул на основі торфу, застарілих мулових відкладень та біомаси на експериментальному конвективному сушильному стенді. Конвективний сушильний стенд дозволяє проводити термічну обробку композиційних гранул при температурі сушильного агенту 30–150°C та швидкості руху 0,5–5 м/с. Проведено порівняння тривалості сушіння мулоторф'яної композиції та її складових, яке показує, що при сушінні композиційних гранул спостерігається інтенсифікація процесу сушіння.

Представлено порівняння кінетики сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул, що показує однаковий характер кривих сушіння та тривалість сушіння (знаходиться в межах 17–18 хвилин). Підбрано оптимальне співвідношення компонентів з метою якісного гранулювання. Визначено ефективні режими сушіння композиційних гранул на основі мулових відкладень, торфу та біомаси. Визначено рівноважні вологості композиційних гранул, що не перевищують стандартну вологість палива.

Ключові слова: застарілі мулові відкладення; торф; біомаса; сушіння; гранули

DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.21-31>

Вступ

Очисні споруди є потенційним джерелом отримання додаткових сировинних ресурсів, що розглядаються сьогодні як відходи, а також нетрадиційних енергоносіїв, потенціал яких повною мірою не використовується, перш за все, через недоліки сучасних технологій очищення стічних вод. Загалом можна стверджувати, що системи водовідведення працюють як техноекосистеми першого виду (відкриті системи, що на вході споживають ресурси і енергію, а на виході створюють продукт і відходи, що не піддаються рециклінгу) [1].

В Україні за 2019 рік у поверхневі водні об'єкти скинуто близько 5,4 млрд м³ стічних вод. З них забруднених стічних вод було скинуто близько 0,7 млрд м³ (13,7% від загального обсягу скидів); нормативно-чистих без очистки – 3,3 млрд м³ (61,1%); нормативно очищених – 1,2 млрд м³ (22,1%) та некатегорованих – 0,2 млрд м³ (3,1%). Найбільше забруднених стічних вод було скинуто в м. Київ – приблизно 0,3 млрд м³ (39% від загального обсягу забруднених стічних вод); в Дніпропетровській області – 0,2 млрд м³ (27,1%). Підприємствами промисловості було скинуто забруднених стічних вод – 0,09 млрд м³ (12,4%), сільського господарства – 0,047 млрд м³ (6,3%) та житлово-комунальним господарством – 0,6 млрд м³ (76,5%). У процесі очищення забруднених стічних вод на каналізаційних спорудах України утворюються біологічно та бактеріологічно забруднені відкладення, які також потребують утилізації [2].

Установлено, що широко використовувані в Україні технології біологічного очищення не забезпечують видалення біогенних елементів. Щорічно разом зі стічними водами у поверхневі водні об'єкти надходить: завислих речовин – $45 \cdot 10^6$ кг; нафтопродуктів – $400 \cdot 10^6$ кг; сульфатів – $800 \cdot 10^6$ кг; хлоридів – $670 \cdot 10^6$ кг; азоту – $10 \cdot 10^6$ кг; нітратів – $60 \cdot 10^6$ кг; нітритів – $2 \cdot 10^6$ кг; СПАР – $0,25 \cdot 10^6$ кг; заліза – $0,770 \cdot 10^6$ кг; фосфатів – $7 \cdot 10^6$ кг [3].

На станціях очищення стічних вод утворюється, окрім очищеної води, група речовин, яку називають осадами стічних вод (ОСВ). Для обробки великих об'ємів стічних вод використовують системи очищення, засновані на утворенні активного мулу або мулового осаду, який залишається роками на звалищах, які потрібно переробляти [4–6].

Основними способами знешкодження або утилізації осадів стічних вод є: використання в сільському господарстві, захоронення на звалищах, викид в океан, спалювання. Окрім традиційних методів, у світі використовують не менш ефективні методи [1].

У країнах Європейського Союзу значну перевагу надають аеробній та анаеробній обробці осадів стічних вод. Дослідженнями встановлено, що під час аеробного перетворення в осаді стічних вод у великій кількості утворюються гумінові кислоти, а під час анаеробного – білки та ароматичні амінокислоти, що є складовою органо-мінеральних добрив у сільському господарстві [7].

Новим наукоємним процесом переробки суміші побутових відходів та осадів стічних вод є низькотемпературний піроліз, який реалізується в Японії, Італії, Німеччині та інших країнах. Піроліз відходів відбувається при температурі 250–400°C. Особливістю низькотемпературного піролізу є те, що перероблюваний осад перетворюється у вуглеводень, спочатку – в газоподібний стан, а після його конденсації отримується основний продукт – «сира нафта» [8].

Зневоднення осадів стічних вод відбувається на мулових майданчиках, механічним зневодненням та термічною сушкою.

Зневоднення – технологічний процес, направлений на збільшення вмісту сухої речовини в осаді.

Мулові майданчики призначені для природного зневоднення осадів, що утворюються на станціях біологічної очистки стічної води, і оброблюють до 90% всього осаду.

Перевага: простота інженерного забезпечення, легкість в експлуатації.

Недолік: залежність від кліматичних та природних факторів.

В залежності від ступеня використання природних процесів мулові майданчики розділяються на майданчики природного та інтенсивного зневоднення і висушування. Перший варіант передбачає перебування осадів в умовах природних процесів випарювання і декантації, тобто осад знаходиться на майданчиках з поверхневим відводом води або на майданчиках-ущільнювачах. У другому варіанті застосовують спеціально виготовлені майданчики зі штучним дренажем, підігрівом, можливістю створення вакууму в дренажній системі, штучним водонепроникним покриттям. Жодних постійних критеріїв, регламентуючих вибір того чи іншого варіанта, не існує. Все визначається місцевими чинниками – кліматичними умовами, територіальними і енергетичними можливостями очисних споруд, їхнім фінансовим станом тощо. Розміри майданчиків і кількість випусків на них осадів визначають, виходячи із вологості осадів, дальності їх розливу, способу утилізації після підсихання.

Мулові майданчики інтенсивного зневоднення і висушування розділяють на традиційні – з вертикальним і горизонтальним дренажем і удосконалені – зі створенням вакууму в дренажній системі, штучним водонепроникним покриттям з повітряною продувкою. І нарешті, майданчики каскадного типу з природною основою і поверхневим відводом води через колодязі в торцевій частині споруди відносять до мулових майданчиків перехідного типу, які будують з метою одержання чистого фільтрату і підвищення швидкості зневоднення. Очевидно, що зневоднення осадів на мулових майданчиках несе загрозу вторинного забруднення, потребує значних капітальних витрат і великих площ під розміщення. Для великих міст з розвинутою інфраструктурою застосування процесів природного зневоднення визнано нераціональним як з економічної, так і з екологічної точки зору. Для ефективного вирішення проблеми осадів необхідно втілювати сучасні, прогресивні методи.

Але наведені технології, як новітні, так і традиційні, спрямовані на переробку активного мулу. Тоді як в Україні існують мулові карти з муловими відкладеннями, яким понад 30 років, що майже позбулись органічної складової та забруднюють ґрунти та підземні води токсичними речовинами. З огляду на це постає завдання поліпшення екології України та створення екологічної енергоефективної технології з переробки застарілих мулових відкладень.

Тому метою роботи є дослідження процесів сушіння композиційних гранул на основі мулових відкладень, торфу та біомаси.

Матеріали та методи досліджень

Для створення гранул використовували застарілі мулові відкладення з м. Фастова, торф з родовища Чернігівської області та біомаси, на прикладі лузги гречки та тирси. З рисунка 1 видно, що зольність мулових відкладень становить 47,3%, що недопустимо при спалюванні. Торф з родовища ДП «Чернігівторф» має достатньо низьку зольність – 14,1%. При поєднанні цих матеріалів зольність композиції становить 33,1%. Зольність біомаси у тирси – 3,1%, а лузги гречки – 1,6%. Для підвищення якості і зменшення зольності мулоторф'яних гранул доцільно до них додавати тирсу та лузгу гречки. Зольність трьохкомпонентних композицій становить 25% [9].

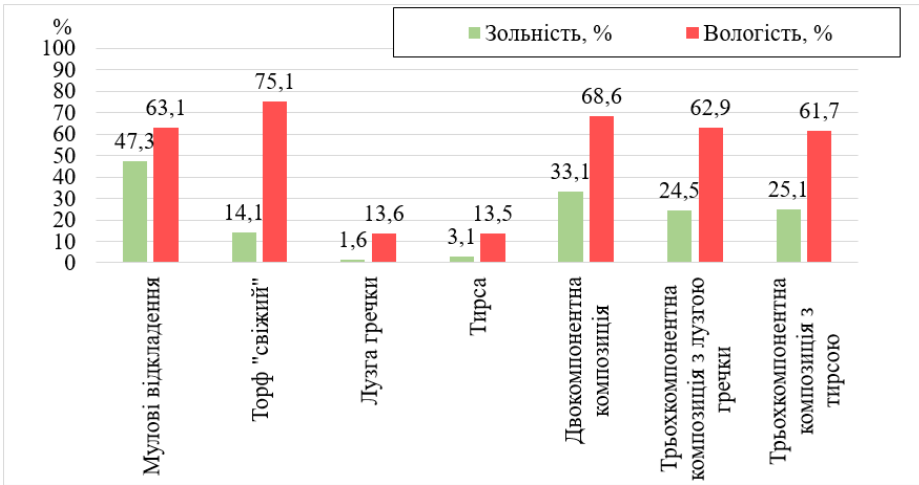


Рис. 1. – Технологічні характеристики сировини

Сформовані композиції піддавали гранулюванню. Для дослідження кінетики процесу сушіння мулоторф'яних гранул застосовували експериментальний конвективний стенд із встановленою автоматичною системою збору та обробки інформації. Конвективний сушильний стенд дозволяє проводити термічну обробку мулоторф'яних гранул при температурі сушильного агента 30–150°C та швидкості руху 0,5–5 м/с. Встановлені високоточні ваги дозволяють реєструвати зміну маси наважки до 0,001 г та підтримувати температуру в сушильній камері із точністю до 0,02°C. Зчитування експериментальних даних про зміну маси та температури зразка, температури сушильного агента в сушильній камері відбувається 7 разів за хвилину [10].

Результати дослідження

На рисунку 2 наведені криві температури та кінетики сушіння торфу, мулових відкладень та їх композиції. Протягом 30 хвилин торф прогрівається до температури сушіння 120°C. Мул досягає цієї температури протягом 20 хвилин. Двокомпонентна композиція має характер прогрівання мулових відкладень і досягає заданої температури через 20 хвилин. Проведено порівняння кінетики сушіння торфу, мулу та композиційних гранул. Як видно з рисунка, у всіх представлених кривих цей період короткий. В основному у нас спостерігається другий період сушіння, який характеризується зменшенням інтенсивності віддачі вологи.

На рисунку 3 представлені температурні криві та кінетики сушіння композиції 50M+50T в залежності від діаметра гранул. Як видно з температурних кривих, прогрів відбувається інтенсивніше в гранулах діаметром 6 мм. Дослідження впливу діаметра гранул показали, що при збільшенні діаметра гранул тривалість сушіння збільшується у 2,2 раза.

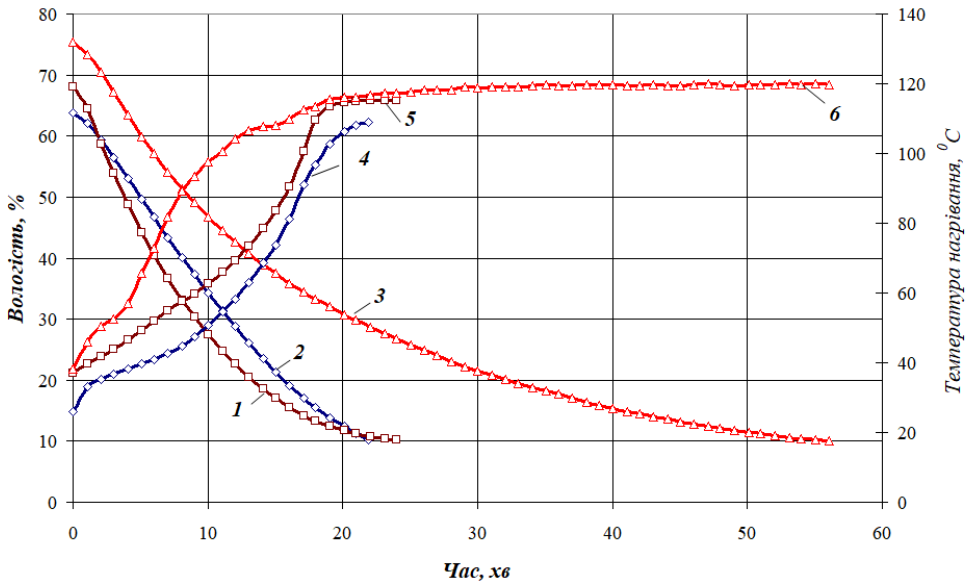


Рис. 2 – Порівняння тривалості сушіння мулоторф’яної композиції та її складових при $t = 120^{\circ}\text{C}$, $V = 2 \text{ м/с}$, $d = 6 \text{ мм}$: 1, 5 – мулоторф’яна композиція; 2, 4 – мул; 3, 6 – торф

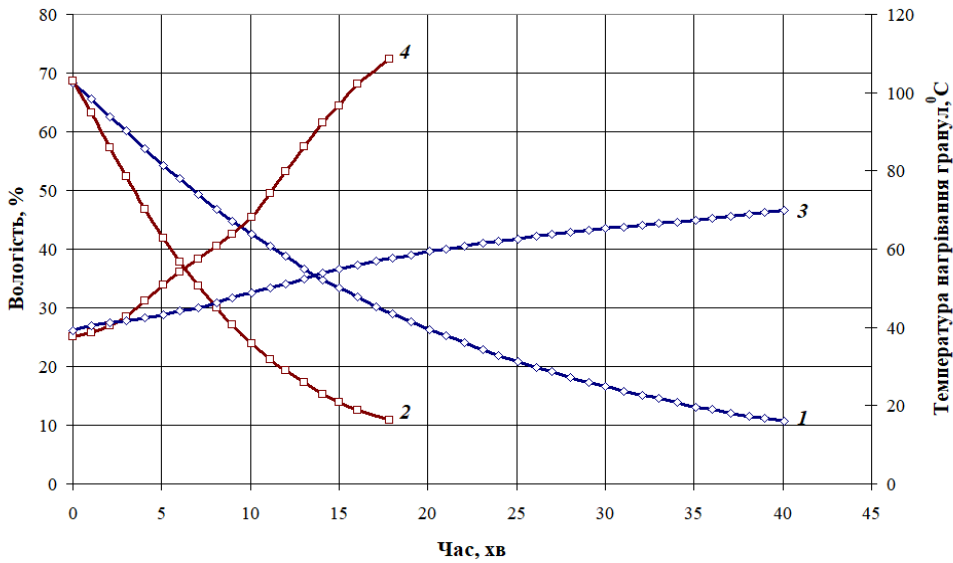


Рис. 3 – Вплив розміру гранул на тривалість сушіння при $t = 120^{\circ}\text{C}$, $V = 2 \text{ м/с}$, пропорція 50% М + 50% Т: 1, 3 – $d = 12 \text{ мм}$; 2, 4 – $d = 6 \text{ мм}$

На рисунку 4 зображені зразки гранул діаметром 6 та 12 мм після сушіння при температурі теплоносія 120°C . Як видно з рисунка, гранули діаметром 6 мм мають однорідну форму та більш міцні.

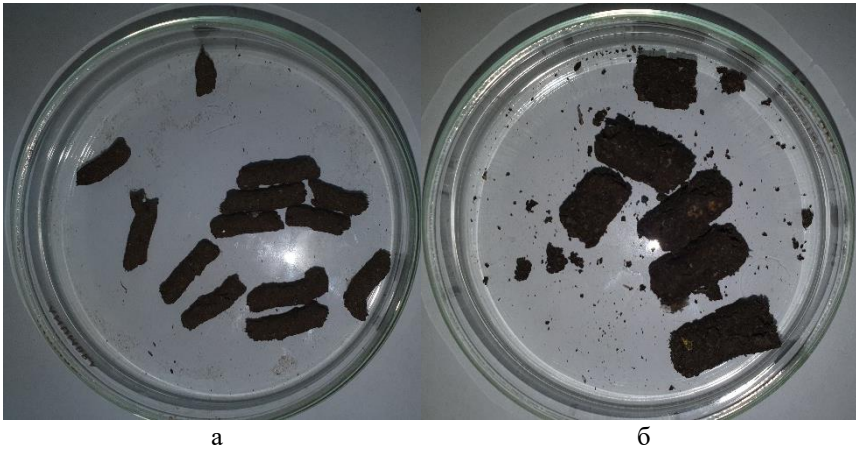


Рис. 4 – Зразки гранул діаметром 6 та 12 мм після сушіння при температурі теплоносія 120°C

На рисунку 5 представлені криві температури та кінетики сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул. Як видно з рисунка 5, кінетика сушіння гранул з трьохкомпонентних композицій схожа і криві налягають одна на одну (криві 2 та 3). Криві кінетики сушіння дво- та трьохкомпонентної композицій показують, що сушіння йде з поступовим зменшенням вологості. Тривалість сушіння гранул як дво-, так і трьохкомпонентної композиції знаходиться в межах 17–18 хв.

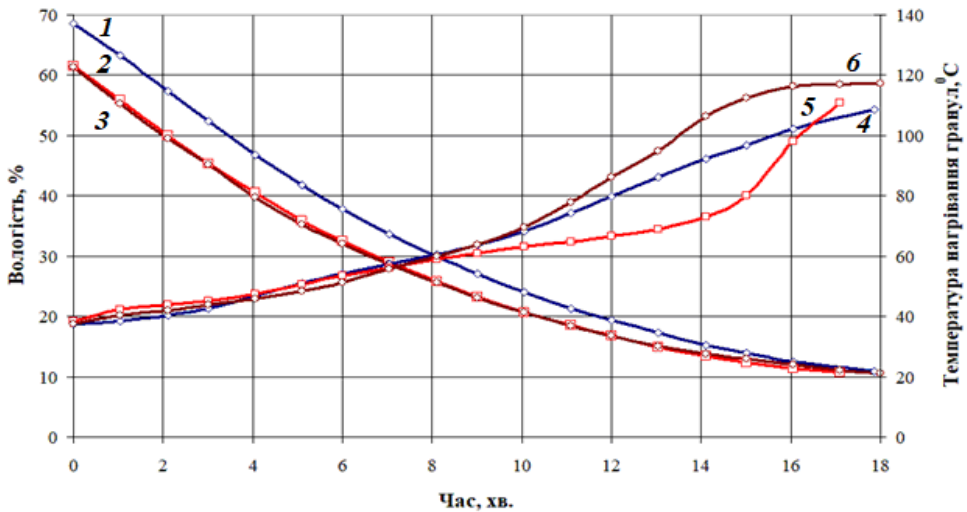


Рис. 5 – Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул при $t = 120^{\circ}\text{C}$, $V = 2 \text{ м/с}$, $d = 6 \text{ мм}$:

- 1, 4 – двокомпонентні гранули у пропорції 50% М + 50% Т;
- 2, 5 – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% М + 45% Т + 10% лузги гречки;
- 3, 6 – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% М + 45% Т + 10% тирси

Температурні криві мають різний характер. Трьохкомпонентні гранули з тирсою до 16 хв прогріваються інтенсивно, виходячи на рівномірну температуру

(крива 6), але гранули з лузгою гречки до 14 хв прогриваються повільно, а після спостерігається різке зростання до кінцевого значення (крива 5).

Порівняння утворених трьохкомпонентних гранул з двокомпонентними показало однаковий характер кривих сушіння. Тривалість сушіння трьохкомпонентних гранул при температурі теплоносія 120°C до кінцевої вологості 10% складає 17–18 хвилин.

При розробці технології переробки застарілих мулових відкладень та одержаних композицій з додаванням до них торфу та біомаси важливе значення має рівноважна вологість, яка визначає не тільки умови їх зберігання, а й кінцевий вологовміст при сушінні.

Криві ізотерм адсорбції композицій та її компонентів зображені на рисунку 6. Двокомпонентна композиція на основі мулу і торфу займає положення між ізотермами торфу та мулових відкладень (рис. 6 крива 5). Як видно з рисунка, три ізотерми адсорбції трьохкомпонентних композицій налягають одна на одну і мають однаковий характер. При $\varphi = 0,4$ рівноважна вологість всіх зразків різна, що свідчить про неоднорідний склад матеріалу. Для торфу – 11%, для мулових відкладень – близько 2%, тирси – 7%, для двокомпонентної композиції на основі мулових відкладень та торфу – 5%, для трьохкомпонентної композиції на основі мулових відкладень, торфу та тирси – 6%, трьохкомпонентної композиції на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки – 6%.

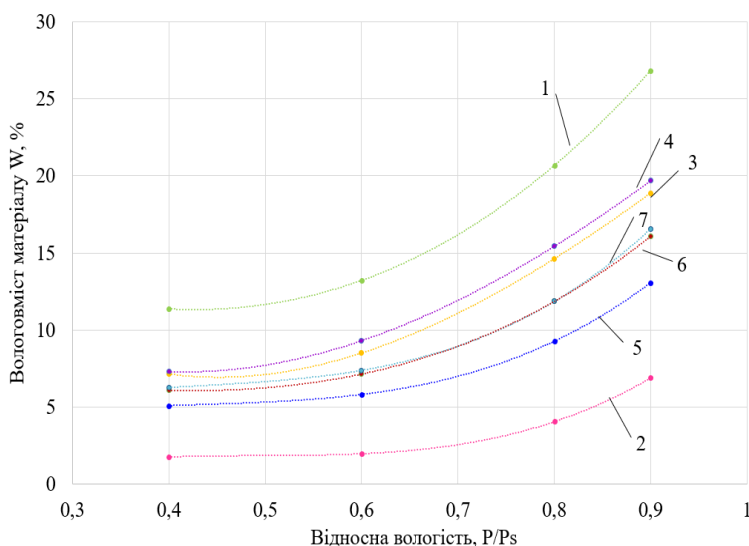


Рис. 6 – Ізотерми адсорбції композицій та їх компонентів:

1 – торф; 2 – мулові відкладення; 3 – тирса; 4 – лузга гречки; 5 – двокомпонентна композиція на основі мулових відкладень та торфу; 6 – трьохкомпонентна композиція на основі мулових відкладень, торфу та тирси; 7 – трьохкомпонентна композиція на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки

Питома теплота згоряння створеної нами композиційної суміші у вигляді гранул на основі мулових відкладень, торфу та органічної сировини відповідає стандартам якісного палива і становить 12,5–16,5 МДж/кг. Питома теплота торфу відповідно становить 12,1 МДж/кг.

Висновки

Отримані в роботі результати експериментальних досліджень з визначення технологічних характеристик є лише одним з етапів досліджень. Підібрано оптимальне співвідношення компонентів з кращими якісними характеристиками, ніж у мулу. Додавання торфу дозволяє понизити зольність мулових відкладень в 1,4 раза, а при подальшому використанні біомаси – в 1,9 раза.

Розмір гранул також впливає на процес сушіння, зі збільшенням діаметра збільшується тривалість сушіння та прогрів проходить не так інтенсивно. Порівняння кінетики сушіння торфу, мулових відкладень та їх композиції показало, що процес сушіння проходить інтенсивніше та має характер сушіння такий же, як і мулових відкладень. Отримані криві кінетики сушіння мають однаковий характер у дво- та трьохкомпонентних гранул, але при цьому температурні криві мають різний характер.

Вперше були проведені дослідження адсорбційних властивостей трьохкомпонентних композицій на основі торфу, мулових відкладень та гречаної лузги.

Отримана рівноважна вологість композицій не перевищує стандартну вологість для паливних гранул (складає 20%) та становить 6–7%. Тому вони можуть бути більш ефективно використані для спалювання в котлах на біомасі. Отриману золу можна застосовувати для виробництва цегли, цементу та інших будівельних матеріалів. Під час зберігання композиційних гранул з метою запобігання втраті їх технологічних властивостей рекомендується підтримувати вологість повітря на рівні 60–70%. Додавання мулових відкладень до паливних гранул дозволить зменшувати рівноважну вологість. Питома теплота згоряння створених композиційних гранул відповідає стандартам якісного палива і становить 15,07 мДж/кг.

Ліквідація накопичених відкладень потрібна для ефективної та безперебійної експлуатації очисних споруд. Тому актуально є розробка технології переробки мулових відкладень на паливні гранули з одночасним одержанням теплової та електричної енергії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М., Новікова 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>
2. Загальні показники використання водних ресурсів України. Портал відкритих даних. [Електронний ресурс]: – <https://data.gov.ua/dataset/2054e342-fd89-4419-b130-685a9d042990>
3. Міністерство з питань комунального господарства України. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2012 році. – Київ, 2013. – 450 с.
4. Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э. Очистка сточных вод. – М.: Мир, 2006. – 480 с.
5. Экологическая биотехнология / Под ред. К.Ф. Форстера, Д.А.Дж. Вейза. – Л.: Химия, 1990. – 384 с.

6. Лихачев Н.И. Канализация населенных мест и промышленных предприятий. Справочник проектировщика / Н.И. Лихачев, И.И. Ларин, С.А. Хаскин и др. Под ред. В.Н. Самохина. – 2 изд. – М.: Стройиздат, 1981. – 639 с.
7. Du H., Li F. Characteristics of dissolved organic matter formed in aerobic and anaerobic digestion of excess activated sludge. *Chemosphere*. – 2017. – V. 168 – Pp. 1022–1031.
8. Пахненко Е.П. Осадки сточных вод и другие нетрадиционные органические удобрения [Электронный ресурс]. URL:<http://files.pilotlz.ru/pdf/cC2968-7-ch.pdf>
9. Петрова Ж.О., Новікова 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>
10. Petrova Z., Sniezhkin Y., Paziuk V., Novikova Y., Petrov A. Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand // *Journal of Ecological Engineering*. – 2021. – 22(6). – Pp. 159–166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>

Стаття надійшла до редакції 30.08.2021 і прийнята до друку після рецензування 10.12.2021

REFERENCES

1. Sniezhkin, Yu., Petrova, Zh., Paziuk, V., & Novikova, Yu. (2021). State of wastewater treatment technologies in Ukraine and the world. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 43(1), 5-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2021.1> (in Ukrainian).
2. General indicators of water resources use in Ukraine. Open data portal. Retrieved from: <https://data.gov.ua/dataset/2054e342-fd89-4419-b130-685a9d042990> (in Ukrainian).
3. Ministerstvo z pytan' komunal'nogo gospodarstva Ukrai'ny. (2013). Nacional'na dopovid' pro jakist' pytnoi' vody ta stan pytnogo vodopostachannja v Ukrai'ni u 2012 roci. Kyiv (in Ukrainian).
4. Hence, M., Armojes, P., Lja-Kur-Jansen J., & Arvan, Je. (2006). *Ochistka stochnyh vod*. Moskow: Mir (in Russian).
5. Forster, K.F., & Vejz, D.A.Dzh. (Ed.). (1990). *Jekologicheskaja biotehnologija*. Leningrad: Himija (in Russian).
6. Lihachev, N.I. (1981). *Kanalizacija naseleennyh mest i promyshlennyh predpriyatij*. Spravochnik proektirovshhika. Moskow: Strojizdat (in Russian).
7. Du, H., & Li, F. (2017). Characteristics of dissolved organic matter formed in aerobic and anaerobic digestion of excess activated sludge. *Chemosphere*, 168, 1022–1031.
8. Pahnenko, E.P. Osadki stochnyh vod i drugie netradicionnye organicheskie udobrenija Retrieved from: URL:<http://files.pilotlz.ru/pdf/cC2968-7-ch.pdf> (in Russian).
9. Petrova, Zh., & Novikova, Yu. (2021). Preparation of raw materials, creation of compositions and granulation from obsolete sludge, peat and biomass. *Ceramics: Science and Life*, 1(50), 14-18. <https://doi.org/10.26909/csl.1.2021.2>
10. Petrova, Zh., Sniezhkin, Yu., Paziuk, V., Novikova, Yu., & Petrov, A. (2021). Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. *Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 159-166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>

The article was received 30.08.2021 and was accepted after revision 10.12.2021

Снєжкін Юрій Федорович

академік НАН України, директор Інституту технічної теплофізики НАН України

Адреса робоча: 03057, Україна, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а

ORCID ID 0000-0001-7871-8774 **e-mail:** ittf_ntps@ukr.net

Петрова Жанна Олександрівна

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник відділу Тепломасопереносу в теплотехнологіях Інституту технічної теплофізики НАН України

Адреса робоча: 03057, Україна, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а

ORCID ID 0000-0001-7385-8495 **e-mail:** bergelzhanna@ukr.net

Новікова Юлія Петрівна

аспірантка, молодший науковий співробітник відділу Тепломасопереносу в теплотехнологіях Інституту технічної теплофізики НАН України

Адреса робоча: 03057, Україна, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а

ORCID ID 0000-0002-6705-1000 **e-mail:** yuliianovikova3@gmail.com

Петров Антон Іванович

аспірант, молодший науковий співробітник відділу Тепломасопереносу в теплотехнологіях Інституту технічної теплофізики НАН України

Адреса робоча: 03057, Україна, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а

ORCID ID 0000-0003-4851-3115 **e-mail:** monoton10@gmail.com