

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ ЗАСТАРІЛИХ МУЛОВИХ ВІДКЛАДЕНЬ

Ж. О. Петрова, доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Ю. П. Новікова, доктор філософії

А. І. Петров, доктор філософії

Інститут технічної теплофізики НАН України

E-mail: bergelzhanna@ukr.net

Анотація. На очисних спорудах крім фільтрованої води під час обробки стічних вод утворюється мулові відкладення. Їх скидають на мулові майданчики, які займають великі площі та майже повністю переповнені. Вміст у відкладеннях великої кількості мінералів та токсичних речовин призводить до погіршення стану ґрунтових вод та ґрунту, що у свою чергу призводить до погіршення екології та життя. Актуальним завданням в Україні є створення комплексної переробки осаду мулу, що включає економічні, технологічні, соціальні та екологічні аспекти.

Мета дослідження – інтенсифікація тепломасообмінних процесів переробки застарілих мулових відкладень з подальшим створенням технології отримання композитного палива на їх основі.

Дослідження кінетики сушіння композитних гранул проводили на експериментальному конвективному стенді з автоматичним збором інформації. Проведено порівняння тривалості сушіння композитних гранул в залежності від способу гранулювання, яке показало доцільність проводити процес для гранул сформованих на шнековому механічному пристрої. Проведені адсорбційні дослідження, дозволили визначити рівноважні вологості. Встановлено, що питома теплота згоряння композиційних гранул перевищує теплоту згоряння торфу в 1,2 рази, що дозволяє використовувати їх як альтернативне паливо.

Ключові слова: застарілі мулові відкладення, торф, гранули, сушіння

Актуальність. В Україні існує проблема переповнених мулових карт, які постійно наповнюються активним мулом з очисних споруд країни. У Львові збудовані каналізаційні очисні споруди за схемами, якими не передбачено використання утвореного осаду. Мулові майданчики Львівських очисних споруд займають площу 22 гектари, де накопичилося понад 1,6 млн тон осаду, а щодня на них транспортується 3 тис. тон свіжого осаду [1]. Бортницька станція аерації є єдиною очисною станцією для міста Києва та прилеглих міст і селищ Київської

області. Збудована в 60-х роках на 3 млн. тон осадів. Мулові майданчики Бортницької станції аерації є надзвичайно небезпечні, оскільки це скупчення напіврідкої маси, площею 272 га, які фактично переповнені втричі. Вони містять 10 млн тон мулової маси замість передбачених 3,5. Раніше активний мул зі станції використовували як добриво для полів, але після аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 році його використання було заборонено. Сучасним рішенням переробки мулу є ущільнення та спалювання його на спеціальних установках [2, 3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На рисунку 1 представлено кількість утвореного осаду стічних вод в різних країнах світу на одну людину. Як видно з рисунка 1 лідером по виробленню осадів стічних вод на людину є Росія, при цьому друге місце посідає Україна, що на у 2,2 рази більше порівно з США. Ці мулові відкладення потрібно переробляти.

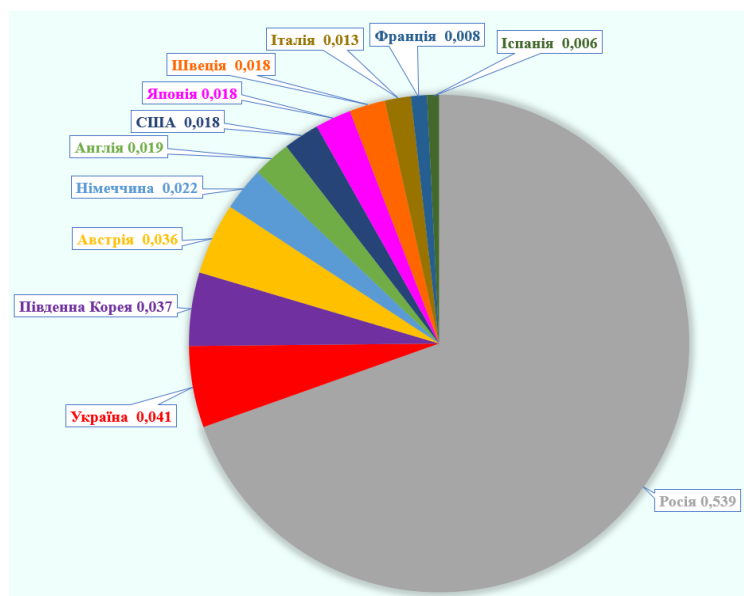


Рис. 1. Кількість утвореного осаду стічних вод у світі, млн. тон/рік на одну людину

Основними способами утилізації мулових відкладень є використання в сільському господарстві, захоронення на звалищах, скидання в океан або спалювання. Як видно з рисунку 2, у світі більш поширені методи це використання в сільському господарстві та захоронення на звалищах. У ЄС і США активний мул перед тим, як скидати його в море чи океан, проходить біохімічну обробку для

видалення мікроорганізмів, ксенобіотиків, токсичних речовин і важких металів тощо.

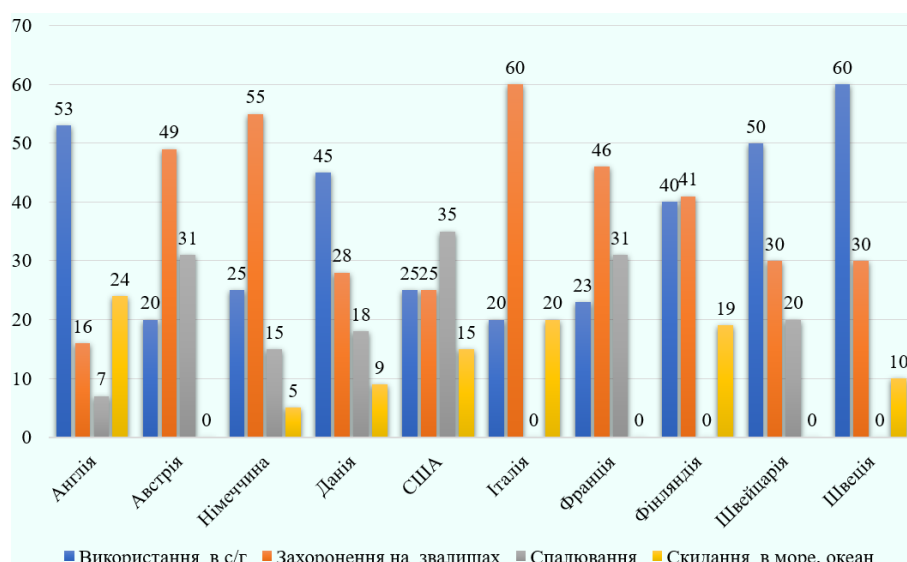


Рис. 2. Основні способи утилізації осадів стічних вод, %

На додаток до традиційних методів очищення стічних вод, показаних на рисунку 2, у світі використовуються нові ефективні методи [2]. У країнах Європейського Союзу широко використовується аеробне та анаеробне очищення стічних вод. Анаеробна обробка осаду стічних вод найчастіше використовується в Іспанії, Великобританії, Італії, Фінляндії та Словаччині, тоді як аеробна технологія перетворення осаду стічних вод використовується в Чехії та Польщі [4]. Крім того у країнах Європи стає все більш популярною технологія виробництва біовугільних пелет. Використання цієї технології на біомасі, включаючи органічні відходи, збільшує теплоту згоряння, споживання енергії та покращує параметри горіння [5].

В Японії поширені методи переробки активного мулу, такі як спалювання, газифікація, сушіння та карбонізація [2]. Водночас мул є цінним джерелом компонентів добрив, необхідних для виробництва адсорбентів та очищення стічних вод від іонів важких металів [6].

На відміну від інших країн в Україні існує проблема мулових майданчиків зі «застарілими» муловими відкладеннями, які зберігалися багато років і майже повністю не містить органічних домішок, що значно ускладнює процес переробки.

«Активний» мул містить близько 80 % органічних домішок і 20 % мінеральних домішок [2].

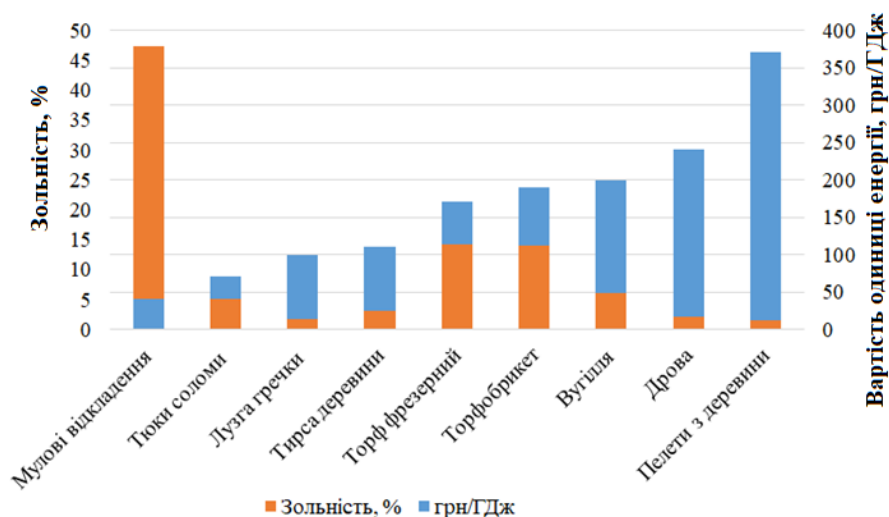


Рис. 3. Зольність і вартість одиниці енергії різних видів палива

На рисунку 3 зображено зольність та вартість одиниці енергії різних видів палива. Як видно з рисунку 3, найбільша вартість у пелет з деревини, при цьому зольність у них достатньо низька. Застарілі мулові відкладення мають достатньо високу зольність, але при цьому не велику вартість. Фрезерний торф має нижчу вартість порівняно з пелетами деревини, тому можливе створення композитних гранул на основі мулових відкладень та торфу.

Мета дослідження – інтенсифікація тепломасообмінних процесів переробки застарілих мулових відкладень з подальшим створенням технології отримання композитного палива на їх основі.

Матеріали і методи дослідження. Для створення товарного виду палива для різних котлів було проведено гранулювання на двох видах гранулятора. На гідравлічному пресі HLR-12, який призначений для формування одиночних гранул, а також на шнековому механічному пристрої, який призначений для формування партій гранул. Дослідження кінетики сушіння проводили на експериментальному сушильному стенді з автоматичним збором інформації, який дозволяє проводити термічну обробку сушильним агентом при температурі 50 – 150 °C та швидкості руху 0,5 – 5 м/с [7].

На рисунку 4 представлена сушильна камера експериментального конвективного стенду. Вона складається з сітки (1), яка розміщена на штанзі терезів (2). Також в стенді встановлено інфрачервоні лампи (3). Термопарами (4) відбувається зняття температури в середині камери та в матеріалі.

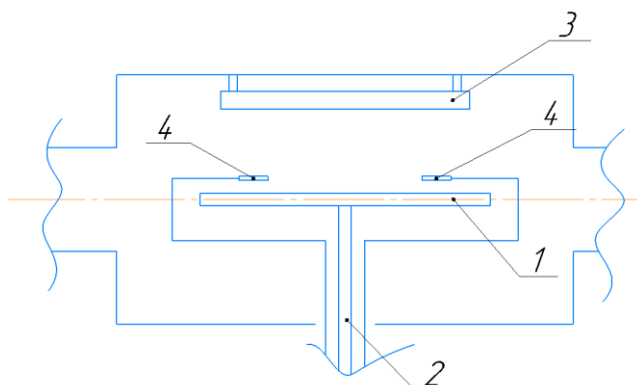


Рис. 4. Сушильна камера експериментального конвективного стенду:
1 – сітка, 2 – штанга терезів; 3 – інфрачервоні лампи, 4 – термопари

Результати досліджень та їх обговорення. В Україні величезні території займають так звані застарілі мулові відкладення. Для досліджень було використано застарілі мулові відкладення, фрезерний свіжий торф та біомасу на прикладі тирси та лузги гречки.

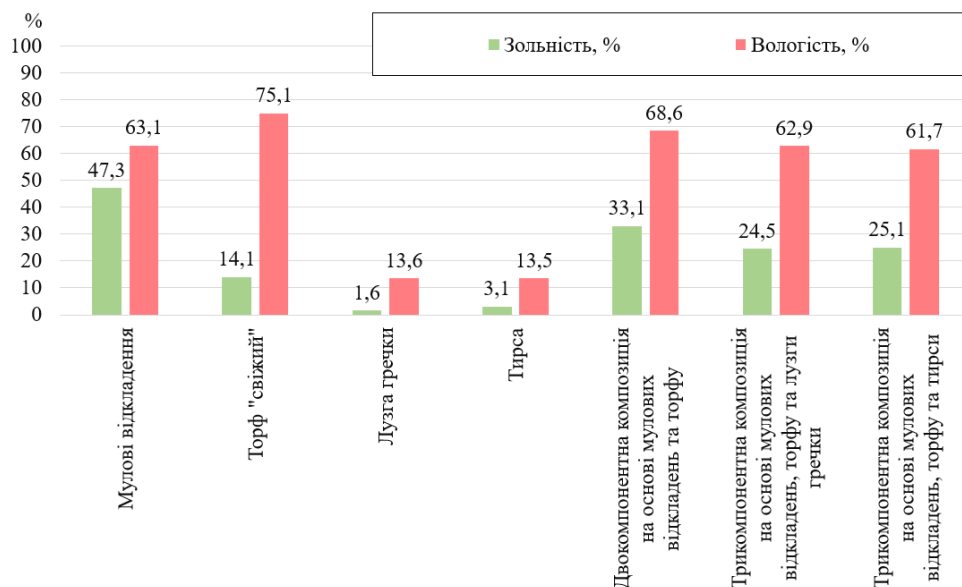


Рис. 5. Зольність та вологість сировини

З рисунка 5 видно, що зольність мулових відкладень становила 47,3 %, що є неприпустимим при спалюванні. Зольність торфу родовища ДП «Чернігівторф»

досить низька – 14,1 %. Поєднання цих матеріалів зменшує зольність компонентів до 33,1 %, що також перевищує допустимі норми для спалювання гранул. Зольність біомаси: тирси становить 3,1 %, лузги гречки 1,6 %. Для поліпшення якості двокомпонентної сировини на основі мулових відкладень та торфуги і зниження зольності рекомендується додавати тирсу і лузгу гречки. Зольність трикомпонентних сумішей становить 25 %. Також наведено питому теплоту згоряння сировини, з якої видно, що теплота згоряння мулу та торфуги схожа [8].

Дослідження кінетики сушіння проводили з параметрами теплоносія температура 120 °С та швидкість $V = 2$ м/с.

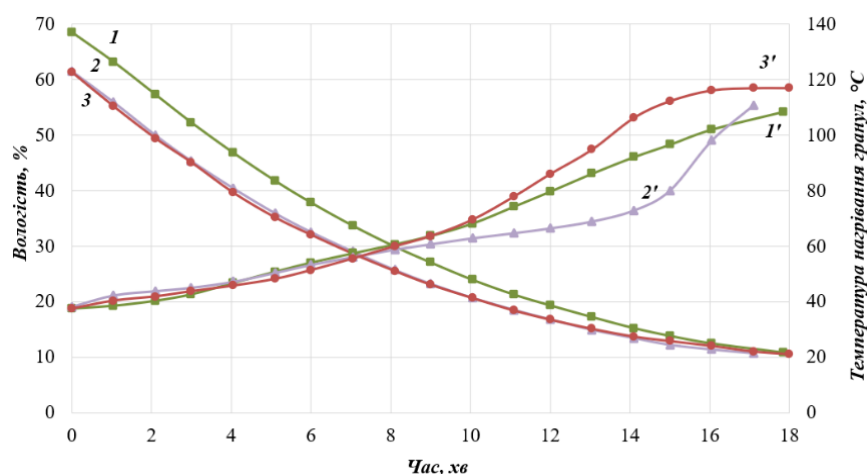


Рис. 6. Зміна вологості (1, 2, 3) і температури всередині гранул (1', 2', 3') дво- та трикомпонентних гранул від часу. Режимні параметри $t = 120^{\circ}\text{C}$, $V = 2$ м/с, $d = 6$ мм:

1, 1' – двокомпонентні гранули у пропорції 50% мулу/50% торфуги;
2, 2' – трикомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфуги/10% гречаної лузги;
3, 3' – трикомпонентні гранули у пропорції 45% мулу/45% торфуги/10% тирси

На рисунку 6 представлено порівняння кінетики сушіння дво- та трикомпонентного композиту при гранулюванні на гідравлічному пресі. Як видно з рисунку, тривалість сушіння гранул у композитах знаходиться в межах 17 – 18 хв, при цьому вони мають різний характер прогрівання.

Дослідження кінетики сушіння композитних гранул, сформованих на шнековому механічному пристрої, представлено на рис.7. Як видно з рис. 7, тривалість сушіння трикомпонентних гранул відбувається швидше на 13 – 25 % від двокомпонентних гранул на основі мулу та торфуги.

Порівнюючи кінетичні криві, представлені на рис. 6 та 7, видно, що у гранул, отриманих на шнековому механічному пристрої, процес йде довше в 1,3 рази тільки у двокомпонентних гранул. Але оскільки на шнековому механічному пристрої відбувається формування партій гранул, тому для подальших досліджень було вибрано цей спосіб гранулювання.

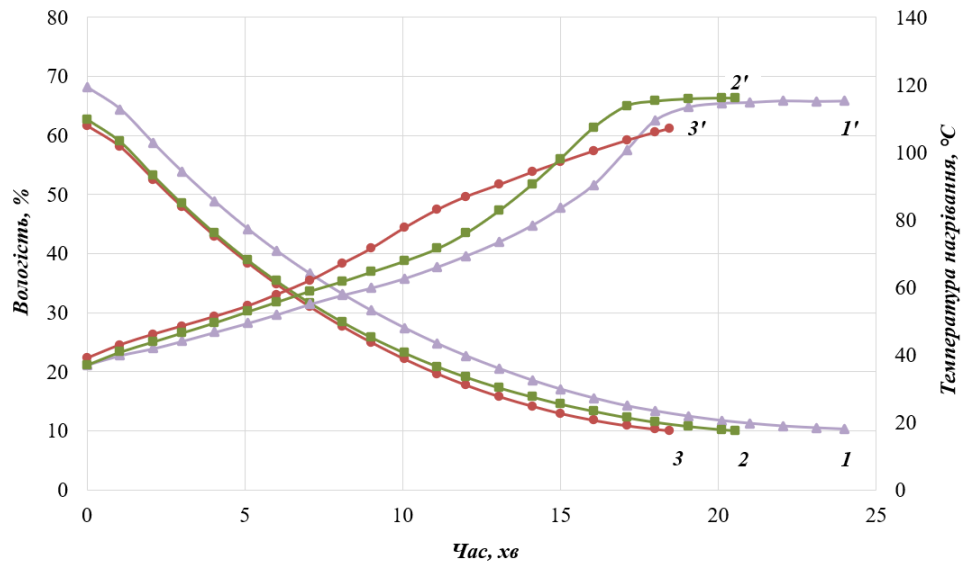


Рис. 7. Зміна вологості (1,2,3) і температури всередині гранул (1',2',3') дво- та трикомпонентних гранул від часу. Режимні параметри $t = 120^{\circ}\text{C}$, $V = 2 \text{ м/с}$, $d = 6 \text{ мм}$:

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

Для визначення оптимальних умов зберігання гранул було проведено адсорбційні дослідження мулових відкладень, торфу, біомаси та композиту на їх основі.

На рис. 8 зображені ізотерми адсорбції композитів їх компонентів. Як видно з рисунку 8, при $\phi = 0,4$ рівноважні вологості тирси (крива 3) та лузги гречки (крива 4) мають однакову рівноважну вологість 6 %, при цьому отримані композиції так само мають однакову вологість 5,5 % та характер кривих.

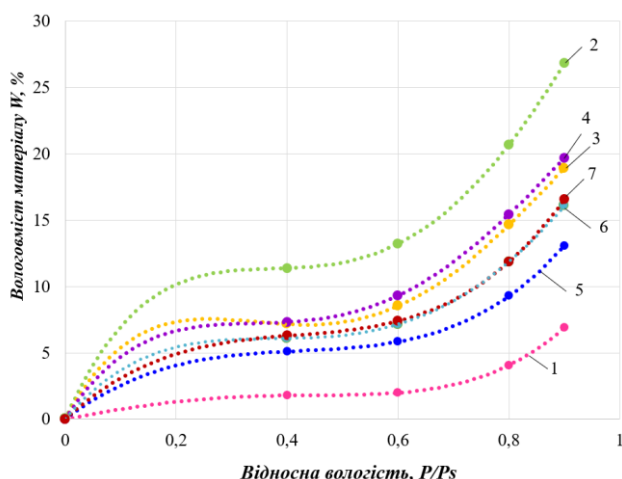


Рис. 8. Ізотерми адсорбції сумішей та їх компонентів:

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

На рис. 9 представлені рівноважні вологості компонентів та їх композитів. У результаті рівноважна вологість композитів не перевищує стандартну вологість паливних гранул (20 %) і становить 6-7 %. Тому його можна використовувати для спалювання в котлах на біомасі. Отриману золу доцільно використовувати для виробництва цегли, цементу та інших будівельних матеріалів. Додавання мулових відкладень до паливних гранул знижує рівноважну вологість.

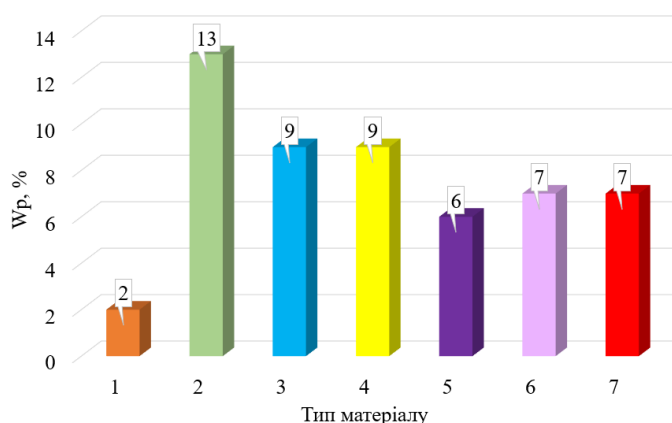


Рис. 9. Рівноважні вологості композиту та його компонентів при $\phi = 0,6\%$:

- 1 – мулові відкладення; 2 – торф; 3 – тирса; 4 – лузга гречки;
 5 – двокомпонентний композит на основі мулових відкладень та торфу;
 6 – трикомпонентний композит на основі мулових відкладень, торфу та тирси;
 7 – трикомпонентний композит на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки

Узагальнені результати вимірювань та розрахунків дослідження питомої теплоти згоряння наведені в таблиці. Як видно з отриманих експериментальних даних теплоти згоряння композитних гранул вища за стандартні значення складових. Питома теплота згоряння торфу становить 12,1 МДж/кг; лузги гречки 16,5-19,8 МДж/кг; тирси 8,37 МДж/кг. Енергетичні показники гранул на основі мулових відкладень достатньо високі (таблиця), що дозволяє їх використовувати як альтернативне паливо для промислових потреб.

Узагальнені результати дослідження теплоти згоряння гранул

Характеристика	Вища теплота згоряння аналітичної проби	Вища теплота згоряння у сухому стані	Нижча теплота згоряння аналітичної проби	Нижча теплота згоряння у сухому стані
	МДж/кг	МДж/кг	МДж/кг	МДж/кг
Мулові відкладення	12,68	13,12	11,84	11,81
Двокомпонентний композит на основі мулових відкладень та торфу	13,87	14,70	12,94	13,39
Трикомпонентний композит на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки	15,08	15,95	14,03	14,64
Трикомпонентний композит на основі мулових відкладень, торфу та тирси	15,71	16,53	14,67	15,22

Висновки і перспективи. Визначено технічні характеристики «застарілих» мулових відкладень та виявлено велику кількість золи, яка потребує зменшення для подальшого спалювання та їх переробки. Тому було підібрано оптимальне співвідношення компонентів композиту для підвищення якості та зниження зольності.

Досліджено процес сушіння, який показав, що тривалість сушіння композитних гранул знаходиться в межах 17 – 24 хвилин. Порівнюючи кінетичні криві при формуванні гранул на різних пристроях, видно, що при отриманні на шнековому механічному пристрої процес йде довше на 1,3 рази тільки у двокомпонентних гранул. Але оскільки на шнековому механічному пристрої відбувається формування

партій гранул, тому для подальших досліджень було вибрано цей спосіб гранулювання.

Проведені адсорбційні дослідження, які дозволили визначити рівноважні вологості та оптимальні умови зберігання композитних гранул, що дозволяють не втрачати якісні показники цих гранул як палива.

Визначена теплота згоряння гранул на основі мулових відкладень достатньо висока, тому їх можливо використовувати як альтернативне паливо.

Отримані результати дозволяють розробити технологію переробки застарілих мулових відкладень на композитне паливо на їх основі.

Список використаних джерел

1. Ключ В. П., Четверик Г. О., Маслюкова З. В. Технології переробки осадів стічних вод каналізаційних очисних споруд. *Відновлювана енергетика*. 2018. № 1. С. 78-84.
2. 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. № 43(1). С. 5-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.1>
3. Блог Ecosoft. Як працює Бортницька станція аерації. URL: <https://ecosoft.ua/ua/blog/bortnicheskaya-stantsiya-aeratsii/> (дата звернення: 17.03.2023).
4. Kaletnik H. M., Honcharuk T. V. Prospects of sewage water use in Vinnytsia to feed the field crops: domestic and foreign experience. *Balanced Natural Resources*. 2016. № 6(3). P. 42–47.
5. Свірідова В. А., Медведєва О. В. Основні проблеми утилізації осадів стічних вод. *Наукові записки*. 2013. № 14. С. 101 – 105.
6. Tyagi V. K., Lo S.-L. Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. №25. Pp. 708–728. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.029>
7. 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>
8. 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>

References

1. Klius V.P., Chetveryk H.O., Masliukova Z.V. (2021). Tekhnolohii pererobky osadiv stichnykh vod kanalizatsiinykh ochysnykh sporud [Technologies for processing sewage sludge from sewage treatment plants]. *Vidnovluvana energetika*, 1, 78-84.

2. Sniezhkin, Yu., Petrova, Z., Paziuk, V., & Novikova, Y. (2021). Stan tekhnolohii ochyshchennia stichnykh vod v Ukraini ta sviti [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>
3. Blog Ecosoft. Yak pratsiuie Bortnytska stantsiia aeratsii [How the Bortnitsa aeration station works]. Available at: <https://ecosoft.ua/ua/blog/bortnicheskaya-stantsiya-aeratsii/> .
4. Kaletnik, H. M., & Honcharuk, T. V. (2016). Prospects of sewage water use in Vinnytsia to feed the field crops: domestic and foreign experience. Balanced Natural Resources, 6(3), 42–47.
5. Sviridova, V.A., & Medvedieva, O.V. (2013). Osnovni problemy utylizatsii osadiv stichnykh vod [The main problems of disposal of sewage sludge]. Naukovi zapysky, 14, 101 – 105.
6. Tyagi, V. K., & Lo, S.-L. (2013). Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery? Renewable and Sustainable Energy Reviews, 25, 708–728. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.029>
7. Petrova, Z., Sniezhkin, Y., Paziuk, V., Novikova, Y., & 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>
8. Petrova, Z., & Novikova, Y. (2021, March 17). Pidhotovka syrovyny, stvorennia kompozytsii ta hranuloutvorennia z zastarylykh mulovykh vidkladen, torfu ta biomasy [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>

INTENSIFICATION OF HEAT AND MASS EXCHANGE PROCESSES OF PROCESSING OLD SLUDGE

Zh. Petrova, Yu. Novikova, A. Petrov

Abstract. *At sewage treatment plants, in addition to filtered water, sludge is formed during wastewater treatment. They are dumped on mud sites, which occupy large areas and are almost completely overflowing. The content of a large amount of minerals and toxic substances in sediments leads to the deterioration of the condition of groundwater and soil, which in turn leads to the deterioration of ecology and life. An urgent task in Ukraine is the creation of complex processing of sludge, which includes economic, technological, social and ecological aspects.*

The purpose of the research is to intensify the heat and mass exchange processes of processing old sludge deposits with the subsequent creation of a technology for obtaining composite fuel based on them.

The study of drying kinetics of composite granules was carried out on an experimental convective stand with automatic data collection. A comparison of the drying time of composite granules depending on the granulation method was carried out, which showed the expediency of carrying out the process for granules formed on a screw mechanical device. Adsorption studies were carried out, which made it possible to determine the equilibrium moisture content. It was established that the specific heat of

combustion of composite granules exceeds the heat of combustion of peat by 1.2 times, which allows them to be used as an alternative fuel.

Key words: old sludge, peat, granules, drying