

В. І. КРАВЧЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії
Херсонський державний аграрно-економічний університет
ORCID: 0000-0003-2245-7194

ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА БІОПАЛИВА НА ОСНОВІ ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ТА БУДІВЕЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ

У статті розглянуті підходи до термоутилізації комунальних відходів в частині осадів стічних вод та одержання продуктів спалювання, які можуть використовуватись як будівельний матеріал. Утворення біо-відходів у вигляді осадів стічних вод на сьогодні досягли обсягу 5 мільярдів тон і продовжують накопичуватись на мулових майданчиках комунальних очисних споруд. Такий стан створює екологічну небезпеку навколишньому середовищу і є серйозною проблемою, що вимагає термінового її вирішення. Застосовуючи термохімічну переробку осадів як паливо на промислових та комунальних підприємствах, можна отримувати теплову енергію і золіві відходи, які використовувати як заповнювач асфальто-бетонних і звичайних будівельних сумішей на мінеральних в'язучих. У ході проведення дослідження було отримано біопаливо у вигляді пелет, для виготовлення яких як сировину використовували осади комунальних стічних вод та тирсу хвойних дерев, як відходи механічної їх переробки. Експериментальним шляхом встановлені основні теплотехнічні характеристики пелет: щільність, зольність та теплота згоряння. Результати показали, що суміш осадів стічних вод та тирси при пресуванні дозволяє виготовляти щільні (вище 1,0 г/см³) та висококалорійні гранули із теплотою згоряння вище 18,0 МДж/кг навіть при відносно невисоких тисках (> 130 МПа). Одержані при спалюванні зольні залишки не стійкі, легко руйнуються з переходом у гетеродисперсний стан і придатні для застосування як будівельний матеріал. Застосування такого способу утилізації осадів стічних вод дозволить у комплексі розв'язувати проблеми ресурсозбереження, енергоефективності та захисту довкілля: утилізувати осади стічних вод, знизити собівартість продукції будівництва і скоротити витрати природної сировини та паливно-енергетичних ресурсів.

Ключові слова: осади стічних вод, утилізація, біопаливні пелети, термохімічна переробка, зольні залишки, будівельні матеріали.

V. I. KRAVCHENKO

Candidate of Technical Science, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Hydraulic Construction, Water
and Electrical Engineering
Kherson State Agrarian and Economic University
ORCID: 0000-0003-2245-7194

PRODUCTION AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF BIOFUELS BASED ON SEWAGE SLUDGE FOR HEAT ENERGY AND BUILDING MATERIALS

In the article considered approaches to the thermal utilization of municipal waste in terms of sewage sludge and obtaining combustion products that can be used as construction material. The generation of bio-waste in the form of sewage sludge has reached the volume of 5 billion tons today and continues to accumulate on sludge sites of municipal sewage treatment plants. This condition creates an environmental hazard and is a serious problem that requires an urgent solution.

By applying thermochemical processing of sewage sludge as fuel at industrial and communal enterprises, it is possible to obtain heat energy and ash waste, which can be used as an aggregate in asphalt-concrete and ordinary building mixtures with mineral binders. In the course of the research, biofuel was obtained in the form of pellets, for the production of which the sediments of municipal wastewater and coniferous sawdust were used as raw materials, as waste from their mechanical processing. The main thermotechnical characteristics of the pellets were established experimentally: density, ash content and heat of combustion. The results showed that the mixture of sewage sludge and sawdust during pressing allows the production of dense (above 1.0 g/cm³) and high-calorie pellets with a heat of combustion above 18.0 MJ/kg even at relatively low pressures (> 130 MPa). The ash residues obtained during combustion are not stable, they are easily destroyed with the transition to a heterodisperse state and are suitable for use as a building material. The use of this method of disposal of sewage sludge will allow solving the problems of resource conservation, energy efficiency and environmental protection in a complex way: dispose of sewage sludge, reduce the cost of construction products and reduce the costs of natural raw materials and fuel and energy resources.

Key words: sewage sludge, utilization, biofuel pellets, thermochemical processing, ash residues, building materials.

Постановка проблеми

Біоенергетика, як одна з технологій відновлюваної енергетики, включає різні природні і похідні матеріали, що у першу чергу відносяться до відходів [1]. Осади стічних вод (ОСВ) є значним побічним продуктом міських каналізаційних очисних споруд. Їх обробка та утилізація стали однією з найсерйозніших екологічних проблем в Україні і світі. Так, на сьогодні в Україні кількість накопиченого осаду сягає більше 5 млрд. т [2], а щорічно у процесі очищення тільки на комунальних каналізаційних очисних спорудах утворюється $45 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ [3] біологічно та бактеріологічно забрудненого осаду, який залишається роками на звалищах, що виводить з обороту значні площі земель та створює екологічну небезпеку навколишньому середовищу, виділяючи при цьому такі забруднюючі речовини як метан, сірководень, оксид азоту, аміак тощо.

Традиційні методи утилізації ОСВ, що застосовуються у світі, наприклад, шляхом депонування та використання у сільському господарстві, є нежиттєздатними через брак ефективних технологій, земельних площ та зростаючі проблеми навколишнього середовища, пов'язані з присутністю шкідливих речовин [2].

Сьогодні більш суворі вимоги по відношенню поводження з місцевими стічними осадами ставлять перед країною нові задачі, одна з яких – знайти напрямки для зміни способу їх утилізації. Так, Закон України «Про водовідведення та очищення стічних вод» від 12.01.2023 р. зобов'язує суб'єкти господарювання, що забезпечують водовідведення, здійснювати облік обсягів утворення, обробки, зберігання та повторного використання ОСВ. Тому зважаючи на значні обсяги утворення та накопичення ОСВ, актуальною є проблема їх ефективної утилізації. Особливого значення утилізація ОСВ може набути у тому випадку, коли буде вирішуватися не тільки природоохоронне завдання, а й економічне, сприяючи поповненню енергетичних, сировинних і матеріальних ресурсів, зокрема будівельних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

ОСВ це комбіновані речовини неорганічного та органічного походження, які містять сполуки кремнію, алюмінію, заліза, окислу кальцію, магнію, калію, натрію та ін. [4], що можуть бути використані як будівельний матеріал для виробництва цегли, виготовлення штучного каменю – наповнювача для виробництва бетону, як добавку до асфальтобетонних сумішей [5].

Останнім часом було впроваджено низку сучасних технологій, що пропонують альтернативний підхід до утилізації ОСВ [6]. Так, оскільки теплотворна здатність сухого ОСВ знаходиться в межах від 10 до 14,5 МДж/кг, що приблизно дорівнює теплоті згоряння бурого вугілля [2], технологію термічної утилізації можна застосовувати на промислових та комунальних підприємствах.

Процес розповсюдження метода спалювання мулових осадів в Україні і світі стримується не тільки високою їх вологістю [6], що можна вирішити із застосуванням сучасного сушильного обладнання, а ще й мінливістю їх складу, розмірами та формою. Через неоднорідний характер горіння такого палива у камері спалювання котла підвищується нерівномірність теплових навантажень його поверхонь, що у кінцевому рахунку призведе до погіршення екологічної ситуації [2].

Перспективним та рентабельним способом переробки осадів може стати використання ОСВ у суміші з іншими біовідходами (наприклад, тирси) як палива заданої форми у вигляді пелет або брикетів, що підвищить характеристики горіння та теплоутворювальну здатність такого палива [1, 2].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є експериментальна оцінка особливостей виготовлення твердого композитного біопалива у вигляді пелет з використанням осадів стічних вод і тирси сосни для термохімічної їх переробки з отриманням теплової енергії і зольних залишків, які можуть використовуватися як будівельний матеріал.

Викладення основного матеріалу дослідження

В експериментальних дослідженнях по виготовленню пелет використовувалась суміш мулових ОСВ і тирса сосни. Обласним комунальним виробничим підприємством (ОКВП) «Дніпро-Кіровоград» у м. Кропивницький було надано два види осадів з системи каналізаційних очисних споруд: ОСВ-1 – з мулових площадок після двох років зберігання; ОСВ-2 – з мулових площадок після трьох років зберігання.

Оскільки надані зразки мулових осадів мали високу вологість, тому перед виготовленням з них палива здійснювалась їх підготовка шляхом термічної та механічної обробки. Після обробки зразки руйнувалися з утворенням окремих частинок, з яких переважна кількість (6–70%) мала розміри 3–5 мм і вологість 16%.

Вибір тирси фракційного складу 0,1–1,0 мм, як компонента композитного палива, був обумовлений широкою її доступністю та достатньо високою теплою згоряння у гранульованому стані 17,2 МДж/кг [7].

При експериментальних дослідженнях виготовлення пелет з суміші тирси та ОСВ застосовувалась наступна технологічна послідовність: підсушування ОСВ та здрибнення; підготовка суміші компонентів; пресування у закриту матрицю; дослідження поверхні пелет; визначення зольності виготовлених пелет.

Для виготовлення пелет з суміші тирси та ОСВ у закритій матриці використовувалась універсальна випробувальна машина УВМ-50, загальний вид робочої частини якої та спеціально виготовлений пристрій, наведено на рисунку 1.

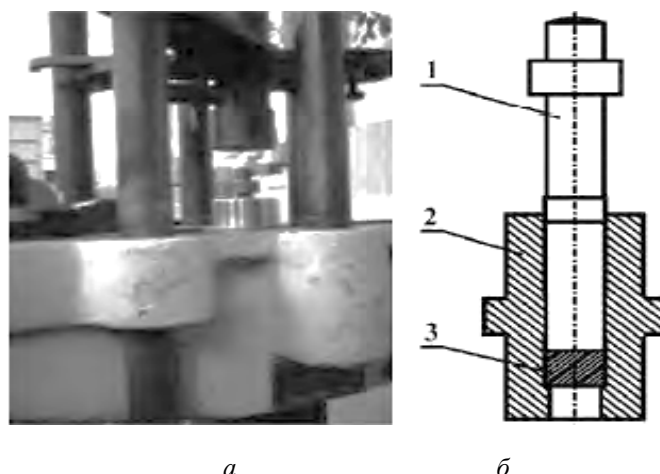


Рис. 1. Робоча частина машини УВМ-50 з встановленим пресовим пристроєм (а), пресовий пристрій (б)

Пресовий пристрій складається з пуансона 1, матриці 2 з внутрішнім діаметром 16 мм та упору 3, встановленого у нижній частині корпусу матриці.

Процес виготовлення пелет у закрити матрицю здійснювався наступним чином. У матрицю 2 пресового пристрою (рис. 1, б), встановлену у робочій частині випробувальної машини, спочатку завантажувалася суміш ОСВ і тирси у визначених пропорціях, приготовлених окрема. Потім у матрицю встановлювався пуансон 1, вмикалася машина УВМ-50 і відбувалося стискання сировини пуансоном з фіксацією значень зусилля пресування. При досягненні планового тиску пресування суміші та утворення сформованого зразка гранули, навантаження знімалося, він виймався і визначалися його фрактографії поверхонь та щільність.

Для фрактографічного вивчення структури поверхонь гранул біопалива, виготовлених з різної сировини, використовувалася оптико-цифровий блок у складі: стереоскопічний мікроскоп моделі МБС-9, Web-камера та ноутбук.

Оцінку зольності здійснювали з використанням муфельної печі. Зольність аналітичної проби сировини визначали за формулою, %:

$$A^a = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де m_1, m_2, m_3 – маса тигля відповідно прожареного, з наважкою проби сировини та із зольним залишком після прожарювання, г.

Перерахунок зольності аналітичної проби на суху масу проводили за формулою, %:

$$A^c = A^a \frac{100}{100 - W^a}, \quad (2)$$

де W^a – вологість сировини, %.

Основні результати експериментальних досліджень наведені у таблиці 1. Загальний вигляд пелет, виготовлених з сумішей мулових осадів і тирси наведені на рисунку 2.

За результатами експериментів по виготовленню композитного палива у вигляді пелет визначено, що у пресовому пристрої з вертикальним пуансоном і закритою матрицею при застосуванні суміші тирси вологістю 12–14% і мулових осадів в різних пропорціях при кінцевих тисках 130,5...217,5 МПа утворюються зразки, які мають доволі гладку бокову поверхню (рис. 2) та достатньо високу питому щільність ρ_n більше 1,0 г/см³ (табл. 1), яка відповідає вимогам європейських стандартів $\rho \geq 1,0$ г/см³.

За результатами експериментів по виготовленню композитного палива у вигляді пелет визначено, що у пресовому пристрої з вертикальним пуансоном і закритою матрицею при застосуванні суміші тирси вологістю 12–14% і мулових осадів в різних пропорціях при кінцевих тисках 130,5...217,5 МПа утворюються зразки, які мають доволі гладку бокову поверхню (рис. 2) та достатньо високу питому щільність ρ_n більше 1,0 г/см³ (табл. 1), яка відповідає вимогам європейських стандартів $\rho \geq 1,0$ г/см³.

Характер структури поверхні пелет та щільність проміжків між часточками сировини після пресування вивчається на зразках різної густини з використанням мікроскопу і окуляру зі шкалою. Фото структури поверхні зразків композитних пелет показано на рисунку 3.

Таблиця 1

Основні результати експериментальних досліджень

№	Сировина	% сировини у суміші	Щільність пелет, ρ_n г/см ³		Теплота згоряння, Q_c , МДж/кг	Зольність, A_c %
			Тиск 130,5 МПа	Тиск 217,5 МПа		
1	Тирса	90	1,01	1,09	17,3	4,7
	ОСВ-1	10				
2	Тирса	70	1,03	1,2	17,9	13,2
	ОСВ-1	30				
3	Тирса	50	1,08	1,27	18,6	23,3
	ОСВ-1	50				
4	Тирса	90	1,02	1,1		
	ОСВ-2	10				
5	Тирса	70	1,05	1,21		
	ОСВ-2	30				
6	Тирса	50	1,1	1,27		
	ОСВ-2	50				



Рис. 2. Зразки пелет (діаметр 16 мм) з ОСВ-2 та тирси, вміст якої складає, %: *a* – 90; *б* – 70; *в* – 50, виготовлених при тиску 130,5 МПа



Рис. 3. Фото структури поверхні зразків композитних пелет: *a* – зовнішня поверхня зразка, виготовленого з тирси і ОСВ-1 з кінцевим тиском 130,5 МПа; *б* – те ж з кінцевим тиском 217,5 МПа

Результати фрактографічних досліджень показали, що з підвищенням щільності пелет (при кінцевих тисках 130,5 і 217,5 МПа) відстань між часточками на поверхні зменшується у напрямку від 0,08 мм (рис. 3 а) до 0,02 мм (рис. 3 б). Зменшення кількості наявних меж між часточками свідчить про підвищення щільності і міцності зразків, виготовлених з більш високим тиском.

Зольність пелет A_c , що наведена у таблиці 1, визначалася експериментально після їх спалювання, а в подальшому перераховувалася на суху масу досліджуваних пелет. Загальний вигляд зольного залишку після спалювання пелет показано на рисунку 4.

Зольність композитних пелет зростає при збільшенні в них вмісту осаду і, наприклад, при зміні концентрацій тирси і ОСВ-1 від 90/10% до 50/50% зольність збільшується на 20,2% (табл. 1). Зольний залишок мав крихку структуру і при незначних зусиллях легко руйнувався з переходом у гетеродисперсний стан (рис. 4).



Рис. 4. Загальний вигляд зольного залишку після спалювання пелет

Вища теплота згоряння на суху масу Q_c досліджуваних пелет, яка приведена у таблиці 1, визначалася за формулою Д. Менделєєва [8] з урахуванням отриманих експериментальних даних по зольності.

Висновки

Встановлено, що при стискуванні у пресовому пристрої з вертикальним пуансоном і закритою матрицею сумішей тирси та мулових осадів при кінцевих тисках пресування 130,5 і 217,5 МПа, виготовлені зразки мають якісну фактуру та високу щільність: відповідно 1,01 і 1,27 г/см³.

Отримані біопаливні пелети є екологічно нешкідливими, відрізняються малою вартістю при достатньо високих теплотехнічних характеристиках, тому їх використання в термохімічних процесах переробки (спалювання, газифікація, піроліз) є доцільним.

Визначено, що зольність композитних зразків пелет в межах відношень їх концентрацій 90/10–50/50 зростала зі збільшенням вмісту ОСВ і складала відповідно 4,7–23,3%. Такі зольні залишки можуть бути використані як будівельний матеріал, заповнювачі цементів, бетонів, асфальту тощо.

Застосування композитного біопалива на основі осадів стічних вод дозволить комплексно розв'язувати проблеми ресурсозбереження, енергоефективності та захисту довкілля: утилізувати ОСВ, знизити собівартість продукції будівництва і скоротити витрати природних мінералів та паливно-енергетичних ресурсів.

Список використаної літератури

1. Tsze L., Sinchzhun Y., Khuei L., Chanchzhu L., Zhykhua S., Khuatsziun K., Khou V., Huanmin T. Spilne hranuliuvannia osadu stichnykh vod i biomasy: shchilnist i tverdist hranul. *Tekhnolohiia bioresursiv*. 2014. Vol. 166, pp. 435-443. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852414007433>
2. Кравченко В.І., Білоус Ю.В., Кравченко В.П. Створення та обґрунтування композитного палива на основі осаду стічних вод. *Технічні науки*. Херсон: ХДАЕУ. 2023. Вип. 3. С. 88–94. URL: <http://journals.ksauniv.ks.ua/index.php/tech/article/view/403>
3. Снежкін В. М., Петрова Ю. Ф., Пазюк Ж. А., Новікова Ю.П. Стан технології очищення стічних вод в Україні та світі. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2021. Вип. 43. С. 5–12. URL: <file:///C:/Users/User/Downloads/425-Article%20Text-675-1-10-20210604.pdf>
4. Сорокіна К. Б. «Процеси та обладнання для обробки осадів» і «Технологія переробки та утилізації осадів». Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології. Харків: ХНУМГ. 2017. 116 с.
5. Зоріна О.В., Маврикін Є.О. Сучасні підходи до обробки та утилізації вторинних осадів господарсько-побутових стічних вод // *Водні ресурси. Меліорація і водне господарство*. 2021. № 2. С. 55–68.
6. Malhozhata V. ta Mariush T. Production of solid biofuel from city sewage sludge. *Technical and economic optimization*. 2015. Vol. 33(8). URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0734242X15588584>
7. Порівняльна характеристика деяких видів палива. Дата оновлення 2016. URL: https://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/8_konferenzii/robota_bezpeka_gir_0.pdf
8. Ялечко В.І. Підвищення ефективності енерготехнологічного процесу спалювання здрібненої деревної біомаси: дис...канд. техн. наук. Львів. 2021. 149 с. URL: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2021/dissertation/11612/disyalchekovi.pdf>

References

1. Tsze L., Sinchzhun Y., Khuei L., Chanchzhu L., Zhykhua S., Khuatsziun K., Khou V., Huanmin T. (2014) Spilne hranuliuvannia osadu stichnykh vod i biomasy: shchilnist i tverdist hranul. *Tekhnolohiia bioresursiv*. 166, 435–443. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852414007433>
2. Kravchenko V. I., Bilous Yu. V., Kravchenko V. P. (2023) Stvorennia ta obhruntuvannia kompozytnoho palyva na osnovi osadu stichnykh vod. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Serii: Tekhnichni nauk*, 3, 88–94. Available at: <http://journals.ksauniv.ks.ua/index.php/tech/article/view/403>

3. Sniezhkin V. M., Petrova Yu. F., Paziuk Zh. A., Novikova Yu.P. (2021) Stan tekhnolohii ochyshchennia stichnykh vod v Ukraini ta sviti. *Teplofizyka ta teploenerhetyka*, 43, 5–12.
4. Sorokina K. B. (2017) «Protsesy ta obladnannia dlia obrobky osadiv» i «Tekhnolohiia pererobky ta utylizatsii osadiv». *Hidrotekhnichne budivnytstvo, vodna inzheneriia ta vodni tekhnolohii*. Kharkiv: KhNUMH. 116.
5. ZorIna O.V., MavrikIn E.O. (2021) Suchasni pIdhodi do obrobki ta utylizatsiYi vtorinnykh osadiv gospodarsko-pobutovykh stIchnykh vod. *Vodni resursi. MelloratsIya I vodne gospodarstvo*. 2. S. 55–68.
6. Malhozata V. ta Mariush T. (2015) Production of solid biofuel from city sewage sludge. *Technical and economic optimization*, 33(8). Available at: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0734242X15588584>
7. Porivnialna kharakterystyka deiakyykh vydiv palyva (2016). Available at: https://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/8_konferenzii/roboata_bezpeka_gir_0.pdf.
8. Yalechko V.I. (2021) Pidvyshchennia efektyvnosti enerhotekhnolohichnoho protsesu spaliuvannia zdribnenoj derevnoi biomasy: dys. ... kand. tekhn. nauk: Lviv, Available at: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2021/dissertation/11612/disyalchkovi.pdf>