

УДК 662.81

Petro Kyriienko¹, PhD, docent, Department of Ecology Technogenic Safety
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8116-7448> **e-mail:** p.kirienko@khai.edu

Andrii Melnykov², PhD, Department of Ecology Technogenic Safety
e-mail: atlonpc@ukr.net

Oleksandr Betin¹, Dr, Professor, Department of Ecology Technogenic Safety
e-mail: o.betin@khai.edu

Kateryna Msallam¹, PhD, docent, Department of descriptive geometry and computer modeling
e-mail: k.msallam@khai.edu

¹National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine

²Ukrainian Scientific Research Institute of Ecological Problem, Kharkiv, Ukraine

COMBUSTION OF PELLETS FROM AGRICULTURAL WASTE

Abstract. *Agricultural waste is a renewable source of energy when it is burned in the form of pellets. When pellets and briquettes are burned, pollutants are released into the environment and waste is generated in the form of ash. Equipping power plants with modern treatment facilities allows reducing atmospheric pollution and reducing the environmental load on the environment. In this work, the processes of formation of pollutants in the process of burning pellets are theoretically considered and the formation of ash and slag waste, which cannot be used as a fertilizer, but needs to be processed or removed in another way, is investigated. Pre-treatment by grinding the slag formed after combustion is an additional technological operation that can be avoided if the correct combustion technology is observed, raw material control, quality control and storage of the components of briquettes and pellets. Studying the composition of the starting raw materials for pellet production is one of the important stages of minimizing slag formation. It should be taken into account that a detailed analysis of the ash composition is an expensive and labor-intensive process that requires expensive equipment. In this case, an important characteristic is the content of silicates in the ash, because it is it that determines the appearance of insoluble slag, which subsequently needs to be dissolved or ground.*

Key words: *grapevine, grape pomace, flax fescue, pellet combustion, carbon, combustion temperature, pollutants, renewable energy sources, agricultural waste.*

П.Г. Кирієнко¹, А.Ю. Мельников², О.В. Бетін¹, К.П. Мсаллам¹

¹Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", м. Харків, Україна

²Науково-дослідна установа "Український науково-дослідний інститут екологічних проблем", м. Харків, Україна

СПАЛЮВАННЯ ПЕЛЕТ З ВІДХОДІВ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Анотація. *Відходи сільського господарства є відновлюваним джерелом енергії при їх спалюванні у виді пелет. При спалюванні пелет і брикет відбувається викид забруднюючих речовин в навколишнє середовище і утворюються відходи у вигляді золи. У цій роботі теоретично розглянуті процеси утворення забруднюючих речовин у процесі згорання пелет та*

досліджено утворення золошлакових відходів, які не можуть бути використані в якості добрива, а потребують переробки або видалення іншим шляхом. Попередня обробка шляхом подрібнення шлаків, які утворилися після спалювання – це додаткова технологічна операція, якої можна уникнути при дотриманні правильної технології спалювання, контролю вихідної сировини, контролю якості і організації зберігання складових брикет і пелет.

Ключові слова: виноградна лоза, жмих, костриця, лушпиння соняшнику, спалювання пелет, вуглець, температура горіння, забруднювальні речовини, відновлювані джерела енергії, відходи сільського господарства.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.35-42>

Вступ

Спалювання викопного палива (вугілля, сланців, нафти, газу та ін.) призводить до виснаження природних ресурсів Землі, яких за розрахунками “Римського клубу” залишилося на 50-150 років, а урану і торію – на 7000 років (1). Окрім того, в навколишнє середовище викидаються парникові гази та забруднювальні речовини: двоокис вуглецю CO_2 , оксиди азоту NO_x , метану CH_4 , пари води, а при спалюванні вугілля, сланців утворюється велика кількість шлаків, які необхідно утилізувати.

Для отримання енергоносіїв можна використовувати енергію води (може бути поверхнева, термальна і підземна), колектори, вітроенергетичні установки, геліоустановки, теплові насоси та ін. Але у цьому випадку так само необхідно зважати на екологічне забруднення навколишнього середовища.

Для отримання енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії використовуються відходи сільського господарства: лушпиння соняшнику, кочерижки кукурудзи, костриця льону і конопель, сіно, солома, відходи деревини, лоза винограду, жмих винограду, а також – у перспективі – енергетичні культури (верба, тополя, міскантус тощо). Необхідно із цих відходів одержувати паливні пелети і брикети, які при спалюванні дають більшу енергетичну ефективність, ніж при спалюванні самих відходів. Але при їх спалюванні в атмосферу викидаються забруднювальні речовини. І все ж це відновлювані джерела енергії. Обладнання енергетичних установок сучасними очисними спорудами дозволяє зменшити забруднення атмосфери і знизити екологічне навантаження на навколишнє середовище. За спеціальними технологіями із відходів можна одержувати паливний газ, який не має в своєму складі сірки та інших забруднювальних домішок (2).

Результати досліджень

У статті зосереджено увагу на аналізі спалювання таких видів пелет: пелети із лози винограду + 10 % лушпиння соняшнику; пелети із лози винограду і костриці льону; пелети із лози винограду + жмих.

Параметри процесу спалювання багатокомпонентних пелет в основному залежать від температури і вмісту кисню в газоповітряному середовищі котлоагрегатів. При підвищенні парціального тиску кисню в спалювальній суміші забезпечується більша окиснюваність пелет. Це залежить від площі розділу твердої і газоподібної фаз, а також від газової суміші в котлоагрегаті.

При збільшенні площі поверхні розділу фаз швидкість і глибина процесів горіння збільшується. Це досягається вдосконаленням технології виготовлення пелет (зменшення дисперсності складових, варіація тиску пресування та ін.).

Хімічний склад пелет залежить від (3):

1. Вихідних складових в пелетах (виноградна лоза, оболонки ягід винограду, продукти бродіння винограду, жмих, лушпиння соняшнику, костриця льону і конопель й інші інгредієнти).
2. Умов очищення інгредієнтів пелет від піску, ґрунту, рослин, забруднювальних речовин, які можуть бути в повітрі.
3. Умов транспортування і зберігання складових для виготовлення пелет.
4. Технологічних способів одержання пелет, тиску пресування, подрібнення інгредієнтів, наявності в складових вологи.
5. Вдосконалення технологій та устаткування для спалювання біопалива аграрного походження.

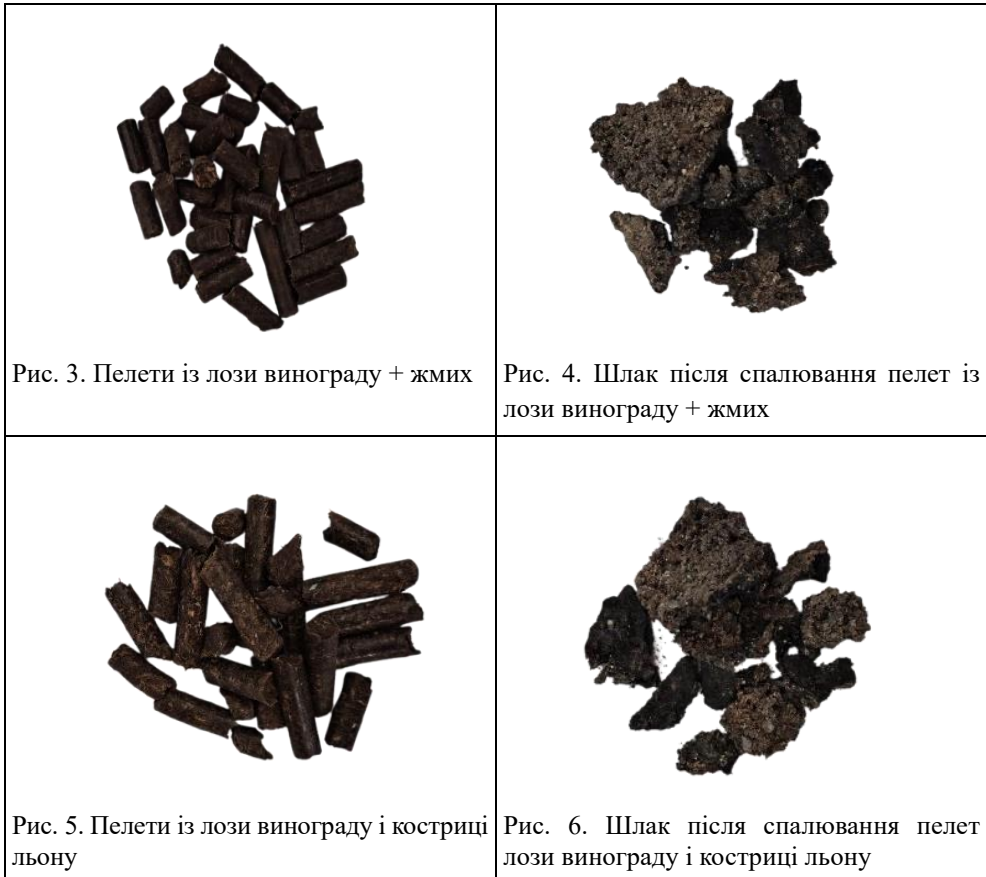
На рисунках 1, 3, 5 представлені двокомпонентні пелети, в склад яких входить виноградна лоза, що виробляється при обрізанні винограду, а також відходи лушпиння соняшнику, костриця льону і жмих, який складається з відходів вичавлювання винограду (кісточки з винограду, виноградні шкірки). За кольором пелети із лози винограду + лушпиння соняшнику та із лози винограду + костриця льону майже не відрізняються, а пелети із лози винограду і жмиху темніші, тому що в них входить жмих, який використовується після бродіння винограду.

На рисунках 2, 4, 6 представлені шлаки після спалювання відповідних пелет. Шлак після спалювання пелет із лози винограду і лушпиння соняшнику дрібний. А в шлаках після спалювання пелет із виноградної лози і жмиху, а також виноградної лози і костриці льону є великі куски шлаку. Це можна пояснити причинами зберігання компонентів на відкритому повітрі, перевезенням насипом та іншими причинами, коли в ці інгредієнти потрапляють забруднювальні речовини, які сприяють утворенню шлаків.

Це ще залежить від місця вироблення пелет. Виноградна лоза, жмих і лушпиння соняшнику виробляються на півдні України, а костриця льону – на півночі України, на південь її треба транспортувати, тому забруднення будуть значними.

Хімічний, а також рентгенофазовий аналіз виноградної лози показав склад цього зразка рослини, таблиця 1.





Таблиця 1.

Компоненти	Вміст, мг/кг
Сахароза	5,40
Глюкоза	15,42
Фруктоза	21,57
Транс-ресфератрол	0,45
Транс-Е-вініферин	0,92
Хлорофіл	18,77
Мінеральні речовини	2,17

Склад сировини для пелет, при їх виготовленні з одного виду рослин залежить від багатьох факторів, зокрема:

1. Агрокліматичні умови зростання.
2. Сорти (зокрема, сорти винограду).
3. Вегетативний період.
4. Характеристика ґрунту.
5. Сприйнятливність до захворювань.

Органічні речовини виноградної лози містять такі елементи:

- 1 С – вуглець.
2. Н – водень.
3. N – азот.
4. О – кисень.

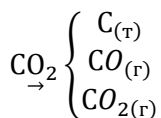
5. P – фосфор.

6. S – сірка.

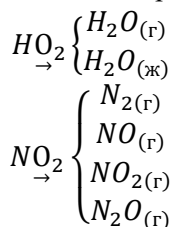
7. Зольні елементи (K, Ca, Mg, Si, Na, Fe, Al, Cu та інші).

При згорянні елементів лози в кисні повітря утворюються:

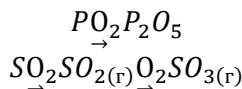
– вуглекислий газ



– * C (сажа) є продуктом неповного згоряння



– O → кисень речовин бере участь в окисленні компонентів пелет



Інші складові під час окиснення переходять у відповідні оксиди, а при тривалій взаємодії може відбуватися сплавляння оксидів металів та неметалів з утворенням важкорозчинних солей.

Відповідно склад золи буде визначатися наступними чинниками:

1. Складом пелет.

2. Їх структурою – більш пухкі пелети будуть більш рівномірно окиснюватись, відповідно краще виходитимуть гази, буде вища температура горіння. Відповідно буде утворюватися менше солей та краще вигорати вуглець.

3. Часом і температурою, при якій відбуватиметься згорання, та виходом золи (конструкція печі). Якщо зола буде видалятися із зони горіння, за високих температур не відбуватимуться процеси сплавляння і утворення великих шматків шлаку (5).

4. Технологією спалювання пелет, вироблених з відходів сільськогосподарського виробництва.

Мінеральні речовини у золі виноградної лози представлені у таблиці 2.

Таблиця 2.

Оксид елементу	Вміст, % у перерахунку на оксид
K ₂ O	52
CaO	15
MgO	6,5
P ₂ O ₅	6,9
SiO ₂	5,4
Na ₂ O	1,7
Fe ₂ O ₃	1,4
Al ₂ O ₃	1,7
C (сажа)	0,8
Інші елементи	8,6

Дослідження складу вихідної сировини для виготовлення пелет є одним із важливих етапів мінімізації утворення шлаку. Треба враховувати, що детальний аналіз складу золи є дорогим та трудомістким процесом, який потребує коштовного обладнання. При цьому важливою характеристикою є вміст силікатів у золі, бо саме він зумовлює появу важкорозчинного шлаку, який у подальшому потрібно розчиняти або подрібнювати. Зважаючи на це, можливо використовувати показники сумарного складу та простіші методи дослідження. А саме як характеристики якості пелет використовувати показники: залишок після прожарювання при 800⁰С, нерозчинний у кислоті залишок після прожарювання при 800⁰С та нерозчинна у кислоті частка в залишку після прожарювання при 800⁰С (6).

Методика вимірювання цих показників полягає у проведенні наступних етапів дослідження: зважування 5 г зразку у порцеляновий тигель; тигель, накритий порцеляною кришечкою, ставиться у муфельну піч, де поступово нагрівається до 800⁰С і витримується при цій температурі протягом 4 годин; після охолодження тигель зважується та розраховується масова частка залишку відносно початкової маси; у тигель додають 20 см³ розчину кислоти азотної 30% мас. та нагрівають до 90⁰С; залишають на нагріві на 30 хвилин; знімають з нагріву та охолоджують; фільтрують крізь фільтр беззолний "синя стрічка"; промивають декілька разів дистильованою водою; фільтр згортають, переносять у порцеляновий тигель та накривають кришкою; проводять озолення спочатку на електричній пічці, потім допалюють у муфелі при 800⁰С; тигель охолоджують та зважують, розраховують нерозчинний у кислоті залишок після прожарювання та нерозчинну у кислоті частку в залишку після прожарювання (7).

Як показує експериментальне дослідження, результати якого наведені в таблиці, гранули мають значну кількість домішок, що можуть утворювати шлак. Також нерозчинний шлак від спалювання цих гранул спостерігався і в умовах їх використання при спалюванні в печі.

Характеристики паливних гранул та матеріалів для їх виготовлення представлені в таблиці 3.

Таблиця 3.

Проба	Залишок після прожарювання при 800 ⁰ С, % мас.	Нерозчинний у кислоті залишок після прожарювання при 800 ⁰ С, % мас.	Нерозчинна у кислоті частка в залишку після прожарювання при 800 ⁰ С, % мас.
Гранула (лоза + 10% лущиння соняшнику)	9,4	5,1	54
Гранула (лоза – костриця льону)	4,3	1,2	28
Гранула (лоза – жмих)	6,7	2,9	43
Лоза чиста	1,9	0,27	14,
Жмих минулорічний	4,2	0,62	15

Найбільше нерозчинного залишку утворюється в пелетах із лози + 10% лушпиння соняшнику – 54%, та із пелет лоза + жмих – 43%, а найменше – із пелет з чистої виноградної лози – 14% та з пелет зі жмиху – 15%. Такі дані можна аргументувати тим, що лушпиння соняшнику і жмих привозяться на вироблення пелет і їх зберігання та перевезення можуть відбуватися із забрудненням з навколишнього середовища. А це пил, пісок та інші речовини, які здатні утворювати нерозчинні солі.

Висновки

1. Склад пелет має важливе значення для теплотворної здатності та викидів в навколишнє середовище, а також проблем, пов'язаних з утворенням шлаків.
2. Забруднення навколишнього середовища спричиняють викиди у повітряне середовище газоподібних забруднювальних речовин CO₂, NO₂ та ін.
3. Найбільше нерозчинних домішок (шлаку) утворюється з пелет, виготовлених із лози + 10% лушпиння соняшнику – 54%, та пелет із лози + жмих – 43%, а найменше – із чистої виноградної лози.
4. Необхідність створення спеціальних котлів для спалювання пелет з відходів сільськогосподарської продукції (костриці льону і конопель, виноградної лози, жмиху, лушпиння соняшнику та ін.).
5. Важливою умовою для зменшення забруднення навколишнього середовища є умови зберігання та перевезення складових пелет.
6. В подальшому, необхідним було б проведення хімічного аналізу димових газів, який дав би відсотковий вміст газів, забруднюючих повітряне середовище.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Основи стійкого розвитку: Навчальний посібник / За загальною редакцією проф. Л.Г. Мельника. – Суми : “Університетська книга”, 2005. – 654 с.
2. Закон України “Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року” від 28.02.2019 №2697-VIII. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2818-17>
3. Виробництво енергії з біомаси в Україні: технології, розвиток, перспективи / Ін-т технічної теплофізики НАН України; за ред. Г. Гелетути. – Київ: Академ періодика, 2022. – 373 с.
4. «Кращі з доступних технологій для житлово-комунального господарства України». Керівництво з відбору технологій / Під редакцією С. Єрмілова. – К.: «Поліграф плюс», 2016. – 134 с.: іл.
5. Гелетути Г., Крамар В., Епик О., Антощук Т., Тітков В. Комплексний аналіз українського ринку пелет з біомаси / Comprehensive analysis of the Ukrainian biomass pellets market. Програма розвитку Організації Об'єднаних Націй, 2016.
6. Б.І. Басок, Б.В. Давиденко, Л.М. Кужель та ін. Особливості процесу спалювання пелет з деревини та соломи в побутовому пальнику. Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті".
7. Лисенко О.М., Веремійчук Г.М., Сірий О.А. Дослідження спалювання пелет сільськогосподарського походження у котлах потужністю до 25 квт. Інститут технічної теплофізики НАН України, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Стаття надійшла до редакції 10.10.2025 і прийнята до друку після рецензування 11.12.2025

REFERENCES

1. Melnyk, L. H. (Ed.). (2005). *Fundamentals of sustainable development* [Textbook]. Sumy: Universytetska Knyha. [In Ukrainian].
2. Law of Ukraine *On the Basic Principles (Strategy) of the State Environmental Policy of Ukraine for the Period up to 2030* No. 2697-VIII (2019, February 28). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2818-17>
3. Heletukha, H. (Ed.). (2022). *Energy production from biomass in Ukraine: Technologies, development, prospects*. Kyiv: Akademperiodyka. [In Ukrainian].
4. Yermilov, S. (Ed.). (2016). *Best available technologies for the housing and communal services sector of Ukraine: Technology selection guidelines*. Kyiv: Polihraf Plus. [In Ukrainian].
5. Heletukha, H., Kramar, V., Epik, O., Antoshchuk, T., & Titkov, V. (2016). *Comprehensive analysis of the Ukrainian biomass pellets market*. United Nations Development Programme.
6. Basok, B. I., Davydenko, B. V., Kuzhel, L. M., et al. (n.d.). Features of the combustion process of wood and straw pellets in a domestic burner. In *Proceedings of the 20th International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century"*. [In Ukrainian].
7. Lysenko, O. M., Veremiichuk, H. M., & Siryi, O. A. (n.d.). Study of combustion of agricultural biomass pellets in boilers with a capacity up to 25 kW. Institute of Engineering Thermophysics of the NAS of Ukraine; National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". [In Ukrainian].

The article was received 10.10.2025 and was accepted after revision 11.12.2025

Кириєнко Петро Григорович

кандидат технічних наук, доцент Національного аерокосмічного університету "Харківський авіаційний інститут"

Адреса робоча: 61070 Україна, м. Харків, вул. Вадима Манька, 17

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8116-7448> **e-mail:** p.kirienko@khai.edu

Мельников Андрій Юрійович

кандидат технічних наук, Науково-дослідна установа "Український науково-дослідний інститут екологічних проблем"

Адреса робоча: 61165, Україна, м. Харків, вул. Єніна Євгенія, 6

e-mail: atlonpc@ukr.net

Бетін Олександр Володимирович

доктор технічних наук, професор Національного аерокосмічного університету "Харківський авіаційний інститут"

Адреса робоча: 61070 Україна, м. Харків, вул. Вадима Манька, 17

e-mail: o.betin@khai.edu

Мсаллам Катерина Петрівна

кандидат технічних наук, доцент Національного аерокосмічного університету "Харківський авіаційний інститут"

Адреса робоча: 61070 Україна, м. Харків, вул. Вадима Манька, 17

e-mail: k.msallam@khai.edu