

ПРИСЯЖНИЮК ДМИТРО

Відокремлений структурний підрозділ «Ладизинський фаховий коледж
Вінницького національного аграрного університету»
<https://orcid.org/0000-0002-6369-5781>
e-mail: m09049@meta.ua

ГУДЗЕНКО НАТАЛІЯ

Відокремлений структурний підрозділ «Ладизинський фаховий коледж
Вінницького національного аграрного університету»
<https://orcid.org/0000-0002-0978-4257>
e-mail: Gudzenko_nm11@ukr.net

ВИКОРИСТАННЯ ШКАРЛУПИ ВОЛОСЬКИХ ГОРІХІВ ЯК ДЖЕРЕЛА АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ

Обґрунтовано доцільність використання шкаралупи волоських горіхів як альтернативного джерела енергії в умовах зростання дефіциту традиційних енергоресурсів та необхідності зниження негативного впливу на довкілля. Проаналізовано сучасний стан та перспективи залучення аграрних відходів у біоенергетиці, зокрема побічної продукції переробки волоського горіха. Наведено характеристику фізико-енергетичних і екологічних властивостей шкаралупи, встановлено її високу теплотворну здатність, низьку зольність і екологічну безпечність спалювання. Значну увагу приділено технологічним аспектам підготовки шкаралупи до енергетичного використання, зокрема впливу ступеня подрібнення, вологості та застосування зв'язуючих компонентів на фізико-механічні та енергетичні показники паливних брикетів. Визначено оптимальний фракційний склад сировини та раціональні умови брикетування, що забезпечують підвищення енергоефективності та експлуатаційної надійності палива. Отримані результати підтверджують перспективність використання шкаралупи волоських горіхів як відновлюваного енергоресурсу та можуть бути використані при розробці енерготехнологічних рішень для агропромислового і комунального секторів.

Ключові слова: шкаралупа волоських горіхів, альтернативна енергія, біомаса, біопаливо, паливні брикети, енергоефективність, аграрні відходи.

PRYSIAZHNIUK DMYTRO, GUDZENCO NATALIIA

Separated structural unit «Ladyzhyn Professional College of Vinnytsia National Agrarian University»

USING WALNUT SHELLS AS AN ALTERNATIVE ENERGY SOURCE

The feasibility of using walnut shell as an alternative energy source is substantiated in the context of the growing deficit of conventional energy resources, rising energy prices, and the need to reduce negative environmental impacts. The paper analyzes the current state and prospects of utilizing agricultural residues in the bioenergy sector, with particular emphasis on by-products of walnut processing. The physical, energy, and environmental characteristics of walnut shell are presented, confirming its high calorific value, low ash content, and environmental safety during combustion compared to traditional solid fuels.

Special attention is paid to the technological aspects of preparing walnut shell for energy use, including the influence of particle size distribution, moisture content, and the application of binding agents on the physical-mechanical and energy performance of fuel briquettes. The effect of grinding degree on bulk density, briquette strength, combustion stability, and specific energy output is analyzed. Rational moisture ranges that ensure effective densification while minimizing energy losses during drying are identified. The role of natural and auxiliary binders in improving briquette integrity and operational reliability during transportation, storage, and combustion is also considered.

Based on experimental and analytical assessments, an optimal fractional composition of raw material and rational briquetting conditions are determined, providing improved energy efficiency, mechanical strength, and stable combustion characteristics of the produced biofuel. The results demonstrate that walnut shell is a promising renewable energy resource capable of partially replacing fossil fuels. The proposed technological solutions can be effectively applied in the agro-industrial and municipal sectors, contributing to sustainable energy development, waste minimization, and reduction of greenhouse gas emissions.

Keywords: walnut shell, alternative energy, biomass, biofuel, fuel briquettes, energy efficiency, agricultural residues.

Стаття надійшла до редакції / Received 22.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 21.11.2025

Постановка проблеми

Сучасний розвиток агропромислового комплексу та енергетичного сектору характеризується зростаючим дефіцитом традиційних енергоресурсів, підвищенням їх вартості та необхідністю зниження антропогенного навантаження на довкілля. В умовах енергетичної нестабільності та курсу на декарбонізацію економіки актуалізується пошук відновлюваних джерел енергії, зокрема на основі побічної продукції сільського господарства [1, 2].

Волоський горіх є однією з перспективних нішевих культур, обсяги виробництва якої в Україні та світі стабільно зростають [3, 4]. У процесі його переробки утворюється значна кількість відходів, основну частку яких становить шкаралупа, масова частка якої сягає 45–55 % від загальної маси плоду [5]. Традиційно шкаралупа волоських горіхів використовується обмежено або утилізується, що призводить до втрати потенційного енергетичного ресурсу.

Разом з тим, шкаралупа волоського горіха характеризується високою теплотворною здатністю (18–20 МДж/кг), низьким вмістом золи та незначною концентрацією сірчистих і азотистих сполук, що робить її перспективною біомасою для використання в твердопаливних котлах, сушильних установках та енерготехнологічних системах агропереробних підприємств [5–7]. Проте широке впровадження даного виду

біопалива стримується відсутністю комплексно обґрунтованих технологічних підходів до підготовки, зберігання та використання шкаралупи як енергоресурсу.

Таким чином, існує науково-практична проблема раціонального використання шкаралупи волоських горіхів як альтернативного джерела енергії, що потребує системного аналізу її фізико-енергетичних властивостей, екологічних переваг та технологічних обмежень з метою підвищення енергоефективності та екологічної безпеки агропромислового виробництва.

Аналіз останніх джерел

Питання використання біомаси аграрного походження як альтернативного палива широко висвітлюються в працях вітчизняних і зарубіжних науковців [8-11]. У дослідженнях з біоенергетики встановлено, що відходи рослинного походження, зокрема лущиння, соломка, деревні рештки та плодіві оболонки, мають значний енергетичний потенціал і можуть ефективно замінювати викопні види палива в локальних енергетичних системах.

Окремі наукові роботи присвячені дослідженню фізико-хімічних властивостей шкаралупи волоського горіха, де відзначається її висока щільність, значний вміст лігніну та стабільні показники теплотворної здатності. Дослідниками доведено, що за рівнем питомої теплоти згоряння шкаралупа перевищує соломку, тирсу та деякі види агровідходів, поступаючись лише кам'яному вугіллю [5-7].

У низці публікацій розглядається екологічний аспект використання шкаралупи горіха як палива [5]. Зокрема встановлено, що викиди CO₂ при її спалюванні є суттєво нижчими порівняно з традиційним вугіллем, а зольність не перевищує 2–3 %, що зменшує експлуатаційні витрати на обслуговування теплогенеруючого обладнання. Також відзначається можливість використання золи як калійно-кальцієвого мінерального добрива.

Разом із тим, аналіз наукових джерел свідчить, що більшість досліджень має фрагментарний характер і переважно зосереджена на загальних енергетичних показниках біомаси без урахування технологічних особливостей підготовки шкаралупи до спалювання [8, 10]. Недостатньо уваги приділено питанням оптимальної фракції подрібнення, допустимої вологості, режимів згоряння та інтеграції даного виду палива в існуючі енерготехнологічні системи аграрних підприємств.

Отже, актуальним є подальше наукове обґрунтування використання шкаралупи волоських горіхів як альтернативного джерела енергії з урахуванням її фізико-механічних, теплотехнічних та екологічних характеристик, а також розробка рекомендацій щодо ефективного практичного застосування в побутовому та промисловому енергоспоживанні.

Метою досліджень є наукове обґрунтування доцільності використання шкаралупи волоських горіхів як альтернативного джерела енергії шляхом аналізу її фізико-енергетичних та екологічних характеристик, а також визначення раціональних технологічних умов підготовки і використання даного виду біопалива в побутових та промислових енергетичних системах з метою підвищення енергоефективності та зменшення негативного впливу на довкілля.

Виклад основного матеріалу

Ефективність використання шкаралупи волоських горіхів як альтернативного джерела енергії значною мірою визначається рівнем її попередньої технологічної підготовки, зокрема ступенем подрібнення та доцільністю застосування зв'язуючих компонентів у процесі виготовлення паливних брикетів. Неподрібнена шкаралупа характеризується високою механічною міцністю, значною варіативністю геометричних розмірів та нерівномірною формою часток, що негативно впливає на умови згоряння та призводить до нестабільності тепловиділення у твердопаливних теплогенеруючих установках (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд шкаралупи волоських горіхів як сировини для біопалива

У зв'язку з цим подрібнення шкаралупи є обов'язковою технологічною операцією, спрямованою на формування однорідного фракційного складу біомаси, підвищення насипної та об'ємної щільності, а також покращення умов тепломасообміну під час процесу згоряння.

За результатами аналізу наукових публікацій та експериментальних досліджень встановлено, що оптимальна фракція подрібненої шкаралупи волоських горіхів для подальшого брикетування становить 3–10 мм [5, 6]. Зменшення розміру часток у зазначеному діапазоні забезпечує рівномірний розподіл матеріалу в об'ємі брикету, підвищує ступінь ущільнення під час пресування та сприяє формуванню стабільної

внутрішньої структури паливного виробу. Крім того, збільшення питомої поверхні часток активізує міжчасткові контакти, що позитивно впливає на механічну міцність брикетів.

Важливою особливістю шкаралупи волоських горіхів є підвищений вміст лігніну, який за умов високого тиску та локального підвищення температури в зоні пресування проявляє термопластичні властивості та виконує функцію природного зв'язуючого елемента [5, 12, 13]. Це створює передумови для виготовлення паливних брикетів без додаткових зв'язуючих речовин, що сприяє збереженню високої теплотворної здатності та зменшенню негативного впливу на екологічні показники процесу згоряння. Проте за недостатнього тиску пресування або низької вологості вихідної сировини міцність сформованих брикетів може бути недостатньою для їх транспортування та тривалого зберігання.

З метою підвищення механічної міцності, водостійкості та стабільності геометричних параметрів паливних брикетів доцільним є застосування додаткових органічних зв'язуючих компонентів. Найбільш поширеними є крохмаль, лігносульфонати, меляса, а також вторинні відходи целюлозно-паперової промисловості. Рекомендований вміст зв'язуючих речовин становить 3–8 % від маси сухої біомаси, що забезпечує формування міцної структури брикету без істотного зниження його енергетичних показників. Основні властивості брикетів залежно від типу зв'язуючого наведено в табл. 1.

Технологічний процес виготовлення паливних брикетів зі шкаралупи волоських горіхів включає такі основні етапи: сушіння сировини до вологості 10–15 %, подрібнення до заданої фракції, дозування та змішування компонентів, пресування під тиском 50–150 МПа, а також охолодження і стабілізацію готової продукції. Отримані брикети характеризуються підвищеною об'ємною щільністю, стабільними показниками тепловиділення та зручністю транспортування і зберігання, що робить їх конкурентоспроможними порівняно з традиційними видами твердого біопалива.

Таблиця 1

Вплив типу зв'язуючого елемента на фізико-механічні властивості паливних брикетів

Тип зв'язуючого елемента	Вміст, %	Механічна міцність	Водостійкість	Вплив на теплотворність
Без зв'язуючого	-	середня	низька	відсутній
Крохмаль	3-5	висока	середня	незначний
Лігносульфонат	4-6	висока	висока	мінімальний
Меляса	5-8	середня	середня	помірний

Для комплексної оцінки доцільності використання паливних брикетів зі шкаралупи волоських горіхів було проаналізовано залежність питомої теплотворної здатності та корисного тепловиділення від фракційного складу сировини та наявності зв'язуючих елементів. Узагальнені результати наведено на рис. 2.

Аналіз наведеного графіка свідчить, що зменшення розміру часток шкаралупи від 15–20 мм до оптимального діапазону 3–10 мм супроводжується зростанням ефективної теплоти згоряння на 6–12 %. Це пояснюється підвищенням щільності брикетів, зменшенням внутрішніх порожнин та більш рівномірним протіканням процесів тепломасообміну під час згоряння. За надмірного подрібнення (менше 3 мм) спостерігається тенденція до незначного зниження енергоефективності, що пов'язано з підвищеними витратами енергії на пресування та погіршенням газопроникності брикету.

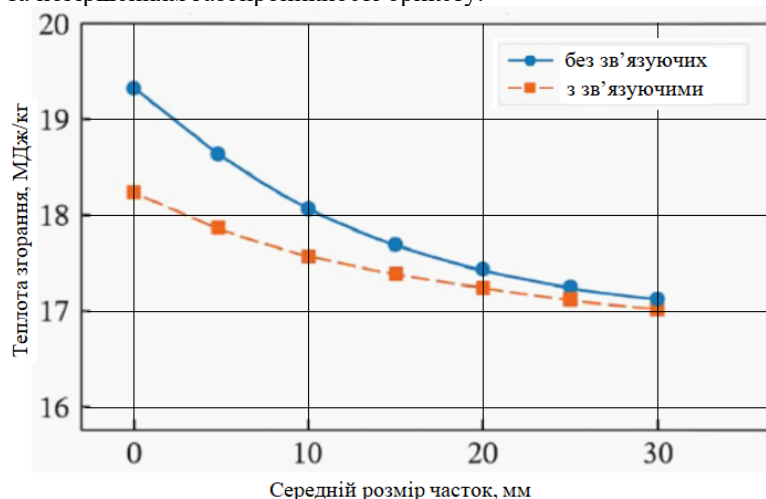


Рис. 2. Залежність енергоефективності паливних брикетів зі шкаралупи волоських горіхів від фракційного складу та використання зв'язуючих компонентів

Використання органічних зв'язуючих компонентів у кількості 3–5 % сприяє стабілізації показників енергоефективності, особливо за коливань вологості вихідної сировини. Як видно з графіка, брикети зі зв'язуючими елементами демонструють більш рівномірне тепловиділення та меншу варіацію питомої теплоти згоряння в порівнянні з брикетами, виготовленими виключно за рахунок природних зв'язуючих властивостей лігніну. При цьому зниження теплотворної здатності не перевищує 2–4 %, що є допустимим з урахуванням зростання механічної міцності та експлуатаційної надійності палива.

Отримані результати підтверджують, що оптимізація фракційного складу та раціональне застосування зв'язуючих елементів дозволяє досягти високого рівня енергоефективності паливних брикетів зі шкаралупи волоських горіхів, наближеного до показників традиційних видів твердого біопалива.

Таким чином, результати досліджень підтверджують, що подрібнення шкаралупи волоських горіхів до оптимальної фракції та обґрунтований вибір зв'язуючих елементів є визначальними чинниками формування якісних паливних брикетів. Оптимізація зазначених технологічних параметрів створює наукові та практичні передумови для широкого впровадження шкаралупи волоських горіхів як ефективного та екологічно безпечного альтернативного джерела енергії в побутовому і промисловому енергоспоживанні.

Висновки та пропозиції

У результаті проведеного дослідження встановлено, що шкаралупа волоських горіхів є перспективним видом біомаси для використання як альтернативне джерело енергії. Аналіз фізико-енергетичних показників підтвердив її високу теплотворну здатність, яка становить 18–20 МДж/кг, низький вміст золи та незначну концентрацію шкідливих домішок, що забезпечує екологічно безпечне спалювання у порівнянні з традиційними видами твердого палива. Встановлено, що використання шкаралупи волоських горіхів дозволяє знизити питомі викиди парникових газів та підвищити рівень енергетичної автономності агропереробних і фермерських господарств.

Доведено, що раціональна підготовка біомаси, зокрема подрібнення до оптимальної фракції та зниження вологості до нормативних значень, є ключовими умовами забезпечення стабільного та ефективного процесу згоряння. Застосування шкаралупи волоських горіхів як палива сприяє комплексному використанню аграрних відходів, зменшенню навантаження на довкілля та формуванню замкнених енерготехнологічних циклів у системі агропромислового виробництва.

Подальші наукові дослідження доцільно спрямувати на експериментальне визначення оптимальних конструктивно-технологічних і режимних параметрів спалювання шкаралупи волоських горіхів у різних типах твердопаливного обладнання. Актуальними є дослідження процесів гранулювання та брикетування шкаралупи з метою підвищення її енергетичної щільності, зручності транспортування та зберігання.

Перспективним напрямом є також оцінювання економічної ефективності використання даного виду біопалива в локальних енергетичних системах, а також вивчення впливу золи від спалювання шкаралупи на агрохімічні властивості ґрунтів. Отримані результати можуть бути використані для розробки рекомендацій щодо впровадження шкаралупи волоських горіхів як альтернативного джерела енергії в агропромисловому секторі та комунальному господарстві.

Література

1. Horvat I. Numerical and experimental methods in development of the novel biomass combustion system concept for wood and agro pellets. / Horvat I., Dović D., Filipović P. // *Energy*. - 2021. - Т. 231. С. 120929.
2. Калетнік Г.М. Технологія переробки волоських горіхів / Г.М. Калетнік, О.В. Цуркан, А.В. Спірін, А.М. Дідик // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2024. – № 2 (113). С. 5–13.
3. Руткевич В.С. Огляд методів та засобів для сушіння волоського горіха в шкаралупі / Руткевич В.С., Дідик А.М. // *Вісник Хмельницького національного університету Серія: Технічні науки*. - 2023. - № 1 (317). С. 230-236
4. Цуркан О.В. Розробка конвективно-вібраційної сушарки для сушіння волоських горіхів / О.В. Цуркан, А.В. Спірін, В.С. Руткевич, А.М. Дідик // *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки* – 2024. – № 2 (331). С. 393–399.
5. Демеденко О. Шкаралупа грецького горіха як паливо: переваги, застосування та секрети [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://retro.ua/shkaralupa-greczkogo-goriha-yak-palyvo-perevagy-zastosuvannya-ta-sekrety/> (дата звернення 3.12.2025)
6. Виробництво деревного вугілля з шкаралупи горіхів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://greenpower.com.ua/clients/articles/2019-05-17-09-04-16/> (дата звернення 3.12.2025)
7. Цуркан О.В., Спірін А.В., Руткевич В.С., Дідик А.М. Використання шкаралупи волоських горіхів в якості палива/О.В. Цуркан, А.В. Спірін, В.С. Руткевич, А.М. Дідик // *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. - 2024. № 6(1) (343). С. 429-433. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-343-6-64
8. Гелетуша Г.Г. Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні. / Гелетуша Г.Г., Желєзна Т.А. // *Аналітична записка БАУ №7. Біоенергетична асоціація України*, - 2014. 31 с.
9. Токарчук Д.М. Перспективи використання відходів рослинництва на виробництво біогазу в Україні. / Токарчук Д.М., Пришляк Н. В., Паламаренко Я. В. // *АГРОСВІТ*. – 2020. - № 22. С.51-57.
10. Колієнко А. Г. Фактори використання відходів в якості палива в теплоенергетичних системах. / Колієнко А. Г., Шеліманова О. В. // *Енергетика і автоматика*. – 2023. - №5 2023 р. С.48-57.
11. Pizzi A. Emissions of heating appliances fuelled with agropellet produced from vine pruning residues and environmental aspects. / Pizzi A. // *Renewable Energy*. - 2018. - Т. 121. С. 513–520.
12. ДСТУ 8900:2019 Горіхи волоські. Технічні умови [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc> (дата звернення 1.12.2025).
13. Wiese J. DEM/CFD modeling of the fuel conversion in a pellet stove. / Wiese J. // *Fuel Processing Technology*. - 2016. - Т. 152. С. 223–239.

References

1. Horvat I. Numerical and experimental methods in development of the novel biomass combustion system concept for wood and agro pellets. / Horvat I., Dović D., Filipović P. // *Energy*. - 2021. - T. 231. S. 120929.
2. Kaletnik H.M. Tekhnolohiia pererobky voloskykh horikhiv / H.M. Kaletnik, O.V. Tsurkan, A.V. Spirin, A.M. Didyk // *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. – 2024. – № 2 (113). C. 5–13.
3. Rutkevych V.S. Ohliad metodiv ta zasobiv dlia sushinnia voloskoho horikha v shkaralupi / Rutkevych V.S., Didyk A.M. // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu Serii: Tekhnichni nauky*. - 2023. - № 1 (317). S. 230-236
4. Tsurkan O.V. Rozrobka konvektyvno-vibratsiinoi susharki dlia sushinnia voloskykh horikhiv / O.V. Tsurkan, A.V. Spirin, V.S. Rutkevych, A.M. Didyk // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: tekhnichni nauky* – 2024. – № 2 (331). C. 393–399.
5. Demedenko O. Shkaralupa hretskoho horikha yak palyvo: perevahy, zastosuvannia ta sekrety [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://retro.ua/shkaralupa-greczkogo-goriha-yak-palyvo-perevagy-zastosuvannya-ta-sekrety/> (data zvernennia 3.12.2025)
6. Vyrobnystvo derevnoho vuhillia z shkaralupy horikhiv. [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <http://greenpower.com.ua/clients/articles/2019-05-17-09-04-16/> (data zvernennia 3.12.2025)
7. Tsurkan O.V., Spirin A.V., Rutkevych V.S., Didyk A.M. Vykorystannia shkaralupy voloskykh horikhiv v yakosti palyva/O.V. Tsurkan, A.V. Spirin, V.S. Rutkevych, A.M. Didyk // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: tekhnichni nauky*. - 2024. № 6(1) (343). C. 429-433. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-343-6-64
8. Heletukha H.H. Perspektyvy vykorystannia vidkhodiv silskoho hospodarstva dlia vyrobnytstva enerhii v Ukraini. / Heletukha H.H., Zheliezna T.A. // *Analichna zapyska BAU №7. Bioenerhetychna asotsiatsiia Ukrainy*, - 2014. 31 s.
9. Tokarchuk D.M. Perspektyvy vykorystannia vidkhodiv roslinnystva na vyrobnytstvo biohazu v Ukraini. / Tokarchuk D.M., Pryshliak N. V., Palamarenko Ya. V. // *AHROSVIT*. – 2020. - № 22. S.51-57.
10. Koliienko A. H. Faktory vykorystannia vidkhodiv v yakosti palyva v teploenerhetychnykh systemakh. / Koliienko A. H., Shelimanova O. V. // *Enerhetyka i avtomatyka*. – 2023. - №5 2023 r. S.48-57.
11. Pizzi A. Emissions of heating appliances fuelled with agropellet produced from vine pruning residues and environmental aspects. / Pizzi A. // *Renewable Energy*. - 2018. - T. 121. S. 513–520.
12. DSTU 8900:2019 Horikhy voloski. Tekhnichni umovy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc> (data zvernennia 1.12.2025).
13. Wiese J. DEM/CFD modeling of the fuel conversion in a pellet stove. / Wiese J. // *Fuel Processing Technology*. - 2016. - T. 152. S. 223–239.