

КУПЧУК ІГОР

Вінницький національний аграрний університет

ORCID ID: [0000-0002-2973-6914](https://orcid.org/0000-0002-2973-6914)e-mail: kupchuk.igor@i.ua

БИСТРИЦЬКИЙ ОЛЕКСАНД

Вінницький національний аграрний університет

ORCID ID: [0000-0002-6597-9112](https://orcid.org/0000-0002-6597-9112)e-mail: ipserhiy@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА

Стаття присвячена огляду та аналізу процесу виробництва твердого біопалива з використанням різних видів сировини. Описано процес подрібнення сировини за допомогою різних типів дробарок та висвітлено особливості кожного з них. Також було проаналізовано ефективність різних методів подрібнення сировини та визначено їх вплив на якість та властивості гранул твердого біопалива. Було зазначено, що оптимальна довжина частинок для гранулювання залежить від типу сировини та може бути різною для різних видів біомаси.

Ключові слова: подрібнення, органічні відходи, біопаливо, пелети, брикети, пресування.

KUPCHUK IHOR

Vinnytsia National Agrarian University

BYSTRYTSKYI OLEXANDER

Vinnytsia National Agrarian University

RESEARCH OF SOLID BIOFUEL PRODUCTION TECHNOLOGY

The article is devoted to the review and analysis of the solid biofuel production process using various types of raw materials. The article describes the process of crushing raw materials using different types of crushers and highlights the features of each of them. The effectiveness of various raw material grinding methods was also analyzed and their impact on the quality and properties of solid biofuel granules was determined. It was noted that the optimal particle length for granulation depends on the type of raw material and may be different for different types of biomass.

In addition, the influence of various impurities on the quality and properties of solid biofuel pellets, such as dust, metal pieces, plastic impurities, etc., was investigated. It was found that the presence of impurities in raw materials can significantly worsen the quality and properties of solid biofuel granules, so it is necessary to carry out quality control at each stage of production. The process of biofuel production using thermochemical methods, such as pyrolysis and gasification, has also been investigated. Data on the effectiveness of using each of the methods and their impact on the quality and properties of biofuel are presented. The process of solid biofuel compression and granulation is considered, and data on the influence of various factors on the quality and properties of granules are given.

Key words: grinding, organic waste, biofuel, pellets, briquettes, pressing.

Постановка проблеми

У зв'язку зі зростанням екологічних проблем та залежності від нестабільних цін на нафту, пошук альтернативних джерел енергії стає актуальним завданням [1]. Тверде біопаливо є одним із джерел, що може бути виготовлене з різних видів, таких як деревина, солома, буряки, сировина з вирощування енергетичних культур тощо. Проте, на даний момент, технології виробництва твердого біопалива не досконалі, існують проблеми з якістю та властивостями гранул, що знижує їх конкурентоспроможність на ринку [2]. Отже, проблема полягає в тому, щоб розробити ефективну технологію виробництва з високоякісними гранулами, які будуть відповідати вимогам ринку та забезпечувати стабільний прибуток виробників [3].

Враховуючи стратегічну важливість формування матеріально-технічної бази для забезпечення високоефективної переробки сільськогосподарських відходів рослинного походження, а також високі енерговитрати, якими відзначається традиційна підготовка біомаси до брикетування, виникає потреба в проведенні досліджень спрямованих на вирішення проблеми енергоефективного подрібнення структурно-неоднорідних матеріалів, у тому числі з високими показниками вологовмісту, що і обумовлює актуальність теми [4].

Аналіз останніх джерел

Останні дослідження в галузі технології виробництва твердого біопалива показують активний розвиток і пошук нових підходів до вирішення проблем в цій галузі. Дослідники з усього світу працюють над поліпшенням технологій та збільшенням ефективності виробництва твердого біопалива. Наприклад, у своїй статті "Recent advances in biomass pretreatment – Torrefaction fundamentals and technology" (2022) Margio та співавтори аналізували принципи торрефікації біомаси, яка є одним з ключових етапів виробництва твердого біопалива. Дослідження дозволило встановити оптимальні параметри торрефікації для різних видів біомаси, що знизило вартість виробництва твердого біопалива.

У роботі "Investigation of biochar as a binder material for biomass pellet production" (2021) автори Кукульська-Журавська та Дума досліджували використання біовугілля як зв'язуючого матеріалу для виробництва гранул твердого біопалива. Вони показали, що додавання біокомпонента зменшує кількість використаного зв'язуючого матеріалу та збільшує якість і ефективність гранул.

У дослідженнях "Optimization of Process Parameters for Biomass Pellets Production Using Response Surface Methodology" (2021) Янг та Юнг використовували методологію реагування поверхні для встановлення оптимальних параметрів процесу виробництва гранул твердого біопалива з використанням

різних видів біомаси. Вони виявили, що вплив температури та часу на якість гранул залежить від типу використаної біомаси.

Метою роботи є дослідження процесу виробництва твердого біопалива з різних видів сировини, визначення оптимальних параметрів процесу та оцінка впливу різних факторів на якість та властивості гранул твердого біопалива. Також метою є порівняння ефективності різних типів дробарок та визначення їх впливу на якість та властивості гранул твердого біопалива.

Виклад основного матеріалу

Тверде біопаливо може бути виготовлене з різних рослинних матеріалів, таких як дерево, солома, торф, сміття та інше [4]. Найбільш поширеним матеріалом для виробництва твердого біопалива є деревина.

Технологія виробництва твердого біопалива може включати наступні етапи:

1. Збір сировини: сировина збирається та транспортується до заводу для подальшої обробки.
2. Дроблення: сировина проходить через дробарку, де вона розтинається на менші шматки. Це зменшує розмір сировини та полегшує подальшу обробку.
3. Сушіння: вологість сировини може бути високою, тому перед подальшою обробкою її необхідно підсушити. Це можна зробити природним шляхом, розкладаючи сировину на відкритому повітрі, або шляхом сушіння в спеціальних сушильних камерах.
4. Пресування: суха сировина подрібнюється ще дрібніше та пресується за допомогою спеціального обладнання у форму брикетів або пелет.
5. Охолодження: після пресування брикети або пелети охолоджуються, щоб зберегтися транспортуватися.
6. Упакування: готові брикети або пелети упаковуються у спеціальні мішки або контейнери для транспортування та зберігання.

Зазвичай технологія виробництва твердого біопалива є досить ефективною та екологічно чистою, оскільки вона використовує відновлювальну сировину та не викидає в атмосферу багато вуглекислого газу [5]. Крім того, тверде біопаливо може бути використовується в різних типах котлів, які використовуються для опалення приміщень або виробничих потреб.

Наприклад, брикети можуть бути використані в спеціальних котлах з прямим спалюванням, а пелети в автоматичних. Паливні гранули та брикети мають значні переваги порівняно з традиційними видами палива: для їх виробництва витрачається близько 3% енергії, при цьому під час виробництва нафти ці енерговитрати становлять близько 10%, електроенергії – 60%, а їх теплотворна здатність знаходиться у межах від 4,5 до 5,0 кВт/кг, що у 1,5 рази більше, ніж у звичайної деревини та вугілля [6]. Також паливні гранули та брикети мають високу конкурентоспроможність, порівняно з іншими видами традиційного палива. Ціни на біопалива не залежать від стрибків цін на вичопні види палива та на екологічні податки, що постійно збільшуються [7]. Завдяки вказаним перевагам твердих біопалив, постає необхідність нарощування темпів їх споживання регіонами України зі зменшенням використання вугілля у структурі енергоспоживання країни.

Ринок паливних брикетів та гранул України, на відміну від ринку біодизеля, вже став самостійним і експортоорієнтованим. Вироблені в Україні гранули, пелети, брикети реалізують як на внутрішньому ринку, так і за межами держави. Експорт твердих біопалив зумовлений вдвічі більшою ціною продажу на цей вид продукції у країнах ЄС, ніж на вітчизняному ринку, а також збільшенням попиту на тверді біопалива з боку європейських ринків.

Тверде біопаливо є екологічно чистим та ефективним вибором, особливо для тих, хто прагне зменшити свою залежність від нафти та інших видів енергії. Крім того, воно може бути виготовлене з відходів виробництва та використання деревини, що знижує витрати на сировину та вплив на навколишнє середовище.

Виробництво твердого біопалива може бути організовано як на великому промисловому рівні, так і на домашньому рівні за допомогою спеціального обладнання. Важливо забезпечити якісну сировину та дотримуватися вимог до якості твердого біопалива, щоб забезпечити ефективне його використання та мінімізувати вплив на довкілля.

Невід'ємними складовими частинами технологічного циклу виробництва такого твердого палива є підготовка біомаси до брикетування з метою забезпечення потрібних розмірів та вологовмісту вихідного продукту [8]. Оскільки відходи рослинного походження відносяться до структурно-неоднорідних матеріалів з різними фізико-механічними характеристиками окремих анатомічних частин (вологовміст, твердість, крихкість тощо), це знижує енергоефективність застосування того чи іншого відомого способу руйнування (наприклад, ударом, стиранням, різанням, розколюванням тощо) та зумовлює потребу в застосуванні кількох стадій подрібнення із використанням відповідного обладнання.

Існує кілька основних методів виробництва твердого біопалива, таких як механічний брикетування, термічна обробка та хімічна обробка.

Механічний брикетування полягає у виготовленні брикетів з сировини шляхом її здавлювання під високим тиском без використання хімічних реагентів [9]. Під час процесу механічного брикетування сировину змішують зі сполучувачем (наприклад, крохмалем або меласою), який допомагає зв'язати частки сировини разом, утворюючи брикет. Зазвичай брикети виготовляють з відходів деревообробки або зі сміття, що містить біомасу, наприклад, з міських зелених зон.

Термічна обробка включає в себе піроліз, торфопіроліз, газифікацію та карбонізацію. Під час термічної обробки сировину піддають впливу високої температури та відсутності повітря [10]. Це допомагає видалити з сировини вологу та легкозаймисті речовини, зменшити вміст димових газів та збільшити

енергетичну цінність біопалива.

Хімічна обробка включає в себе гідроліз, естерифікацію та трансестерифікацію. Під час гідролізу високомолекулярні біомаси розкладаються на менші молекули за допомогою води та кислоти або лужної обробки. Естерифікація використовується для перетворення жирів та олій на біопаливо. Трансестерифікація використовується для перетворення жирів та олій на біодизель.

Одна з переваг механічного брикетування полягає в тому, що цей процес не вимагає великих інвестицій та може використовуватись для переробки різних видів сировини. Недоліком механічного брикетування є те, що витрати на енергію для здавлювання сировини під високим тиском можуть бути значними, а також можуть виникнути проблеми зі зносом обладнання.

Термічна обробка є ефективним методом для виробництва твердого біопалива, особливо зі сировини, яка містить великі кількості вологи та легкозаймистих речовин [11]. Однак термічна обробка може бути дорогим та складним процесом, що вимагає великих інвестицій в обладнання та інженерні рішення.

Хімічна обробка є ефективним методом для перетворення біомаси на тверде біопаливо, але вона може бути дорогим та складним процесом, що вимагає великих інвестицій в обладнання та хімічні реагенти. Крім того, хімічна обробка може створювати проблеми зі видаленням залишків хімічних реагентів та інших відходів.

У кінцевому підсумку, технологія виробництва твердого біопалива залежить від доступної сировини, технічних можливостей та ринкових умов.

Залежно від технології виробництва, сировина для виробництва твердого біопалива може відрізнятися за складом та показниками (табл. 1). Однак, нижче наведено загальні показники для декількох видів біомаси, які можуть використовуватися для виробництва твердого біопалива:

Таблиця 1

Загальні показники різних видів біомаси

Сировина	Вологість, %	Зольність, %	Калорійність, МДж/т
Деревина хвойних	40-60	0,4-1,5	16-19
Деревина листяних	30-50	0,5-2,5	18-21
Деревопродукти	20-30	0,5-2,0	18-21
Солома	12-20	3,0-8,0	14-17
Сіно	15-20	3,0-8,0	14-17
Сухі листя та гілки	10-15	3,0-8,0	15-18
Сировина кукурудзи	12-18	2,0-6,0	15-17
Сировина пшениці	12-18	2,0-6,0	15-17
Органічні відходи	50-70	20-30	8-15
Просо	10-15	3,0-8,0	18-21

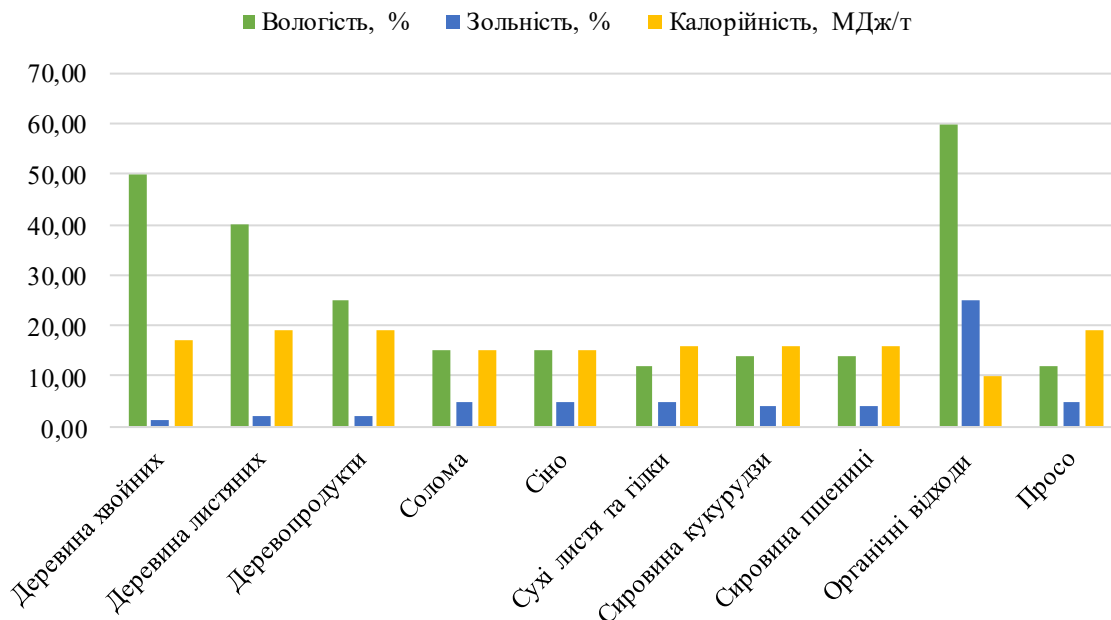


Рис. 1. Енергетичні показники сировини для виготовлення твердого палива

Наприклад, біомасу проса можна використовувати в процесі спалювання як окреме паливо або спалювати разом з вугіллям. Однак використання проса як єдиного джерела палива або в суміші на електростанціях великої потужності не є поширеним або економічно вигідним [12]. Це відбувається внаслідок зашлакування та забруднення систем згоряння. Причиною цього несприятливого явища є наявність у біомасі калію, кальцію, магнію, хлору та кремнію у більших кількостях, ніж у вугіллі. Чим вищий вміст калію та натрію, тим нижча температура плавлення золи біомаси і, як наслідок, більше шлаку та корозії котла. Газоподібний хлор і хлористий водень є основними факторами корозії енергетичних котлів, але дія HCl на

метал котла менш небезпечна, ніж Cl_2 . Хлориди, особливо калію та натрію, що виділяються під час спалювання біомаси, конденсуються на поверхні котлів і труб пароперегрівачів. Потім у реакції хлоридів з оксидами заліза, присутніми в відкладеннях, або SO_2 , яка виникає у відпрацьованих газах, утворюються хлор і хлористий водень відповідно. Тверді продукти цих реакцій, з іншого боку, розплавляються у склоподібний в'язкий шар, який захоплює нелеткі елементи (Ca, Si та Mg), з яких утворюються силікати з нижчою температурою плавлення, ніж у випадку хлоридів, що збільшує ризик корозії.

Ефективність спалювання біомаси проса також залежить від вмісту золи та вологи. Складу і калорійності проса наведені в таблиці 3. Відносно високий вміст золи пояснюється більшою часткою листя, яке може містити в 3 рази більше золи, ніж стебла, в біомасі цієї рослини (табл. 2). Зола знижує теплотворну здатність біомаси. Високий вміст вологи в біомасі також призводить до зниження калорійності, і цей вміст не повинен перевищувати 23%. У процесі спалювання біомаси вміст азоту також важливий, оскільки він впливає на викиди NO_x .

Процес подрібнення є однією з основних стадій при виробництві твердого біопалива з біомаси. Метою цього процесу є зменшення розміру сировини та збільшення її поверхні для подальшої обробки. Подрібнення може здійснюватися за допомогою різноманітних видів обладнання, залежно від виду біомаси та вимог до фракцій результуючої продукції.

Найпоширенішим типом обладнання для подрібнення є дробарки. Для деревини використовуються дискові та барабанні дробарки. При цьому деревина подрібнюється на фракції різної величини – від дрібної стружки до кусочків деревини довжиною до 10 см (табл. 3).

Для подрібнення соломи застосовуються різні типи обладнання, наприклад, молоткові дробарки та прес-підбирачі. Молоткові дробарки дозволяють подрібнювати соломку на фракції різного розміру, а прес-підбирачі додатково стискають соломку для отримання щільнішого матеріалу.

Для подрібнення використовуються різні типи дробарок, наприклад, валкові, дискові, молоткові та кулачкові. Даний процес відбувається з метою зменшення розміру та збільшення поверхні буряку для подальшої обробки.

Для органічних відходів зазвичай використовуються різноманітні типи дробарок, такі як молоткові дробарки, валкові дробарки, дискові дробарки, а також гранулятори.

Таблиця 2

Класифікація дробарок для виробництва твердого біопалива за технічними показниками

Тип дробарки	Призначення	Продуктивність, т/год	Потужність, кВт	Розмір подрібненої фракції, мм
Молоткова	Солома, деревина, органічні відходи	1-20	15-400	1-50
Дискова	Деревина	5-25	30-350	3-60
Барабанна	Деревина	10-50	60-600	10-100
Валкова	Буряк цукровий	5-30	10-150	2-20

Таблиця 3

Класифікація дробарок для виробництва твердого біопалива за ефективністю подрібнення

Тип дробарки	Сировина	Розмір початкової сировини, мм	Розмір подрібненої фракції, мм	Ефективність подрібнення, %
Молоткова	Солома	до 100	1-10	70-90
	Деревина	до 200	10-50	60-80
	Органічні відходи	до 200	5-20	80-90
Дискова	Деревина	до 300	10-60	70-90
Барабанна	Деревина	до 500	20-100	80-95
Валкова	Буряк цукровий	до 50	2-10	85-95

Як бачимо з таблиці, ефективність подрібнення залежить не тільки від типу дробарки, але й від типу та розміру сировини, що піддається подрібненню. Ці дані можуть бути корисними для вибору оптимального типу та моделі дробарки для конкретного виробництва.

Дослідження показали, що подрібнення сировини для виробництва твердого біопалива має значний вплив на якість та властивості гранул. Нижче наведені деякі фактори, що впливають на якість та властивості гранул після подрібнення:

1. Розмір часток сировини: більш дрібна сировина забезпечує кращу якість та однорідність гранул.
2. Вологість сировини: волога сировина може привести до погіршення якості та розсіпання гранул.
3. Тип обладнання для подрібнення: різні типи дробарок мають різну ефективність та якість подрібнення, що може вплинути на якість гранул.
4. Тиск та температура під час формування гранул: високий тиск та температура можуть забезпечити кращу якість та міцність гранул.
5. Вміст липких речовин: високий вміст липких речовин може привести до склеювання гранул та

погіршення їх якості.

6. Склад сировини: різні види сировини мають різний склад та властивості, що може вплинути на якість та властивості гранул.

Висновки

Дослідження показали, що оптимальні умови подрібнення для досягнення кращої якості та властивостей гранул залежать від конкретної сировини та умов виробництва. Тому важливо проводити індивідуальні дослідження для кожного типу сировини та встановлювати оптимальні умови подрібнення для досягнення найкращих результатів.

Література

1. Бабенко О. В., Бурдейний О. В., Безгубенко, О. М. Перспективи використання біомаси для виробництва електроенергії в Україні. Економіка та держава. 2016. № 12. С. 39–42.
2. Ковальов О. В. Аналіз сучасних технологій виробництва твердого біопалива. Енергетика та електрифікація. 2015. № 4. С. 25–31.
3. Медведєв В. П., Іванов, А. Ю. Оптимізація процесу виробництва твердого біопалива. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2018). № 17. С. 46–54.
4. Rutkevych V., Kupchuk I., Yaropud V., Hraniak V., Burlaka S. Numerical simulation of the liquid distribution problem by an adaptive flow distributor. *Przeegląd Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98 (2). P. 64–69.
5. Гуменюк О. О., Соколовський, О. І. Дослідження впливу вмісту вологи на властивості біопаливних гранул. Технологія і техніка друкарства. 2019. № 3(63). С. 55–61.
6. Бандурко В. І., Міщенко, О. Ю. Виробництво біопаливних гранул з побутових відходів. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Хімія. (2016). № 36. С. 70–73.
7. Михайленко В. А. Оцінка економічної ефективності виробництва біопалива в Україні. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Економіка та менеджмент підприємства. 2017. № 871. Р. 146–153.
8. Карпенко В. С., Кудрицький, О. В. Дослідження впливу каталізатора на процес газифікації біомаси. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2016. № 4. Р. 17–24.
9. Бурлака С.А. Алгоритм функціонування машинно-тракторного агрегату з використанням системи живлення зі змішувачем палив. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2022. № 1 (305). С. 140–144.
10. Кучерявий В. В., Кононова, О. В. Аналіз технологічних схем виробництва твердого біопалива з використанням методів математичного моделювання. Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. Серія: Технічні науки. 2017. № 23. С. 58–61.
11. Бурдейний О. В., Бабенко О. В. Технології виробництва біопалива: світовий та український досвід. Енергетика та електрифікація. 2015. № 4. С. 5–10.
12. Микитюк Ю. В., Піддубний Ю. В. Аналіз ринку твердого біопалива в Україні. Економіка та прогнозування. 2019. № 1. С. 87–98.

References

1. Babenko, O. V., Burdeiniy, O. V., & Bezgubenko, O. M. Prospects for the use of biomass for electricity production in Ukraine. *Economy and the state*. 2016. No. 12. P. 39-42.
2. Kovalev, O. V. Analysis of modern technologies of solid biofuel production. *Energy and electrification*. 2015. No. 4. P. 25-31.
3. Medvedev, V. P., & Ivanov, A. Yu. Optimization of solid biofuel production process. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: Energy and heat engineering processes and equipment. 2018). No. 17. P. 46-54.
4. Rutkevych V., Kupchuk I., Yaropud V., Hraniak V., Burlaka S. Numerical simulation of the liquid distribution problem by an adaptive flow distributor. *Przeegląd Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98 (2). P. 64-69.
5. Humenyuk, O. O., & Sokolovskyi, O. I. Study of the influence of moisture content on the properties of biofuel granules. *Printing technology and technique*. 2019. No. 3(63). P. 55-61.
6. Bandurko, V. I., & Mishchenko, O. Yu. Production of biofuel pellets from household waste. *Scientific Bulletin of Uzhhorod University*. Series: Chemistry. (2016). No. 36. P. 70-73.
7. Mykhaylenko, V. A. Assessment of the economic efficiency of biofuel production in Ukraine. *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University*. Series: Economics and enterprise management. 2017. No. 871. R. 146-153.
8. Karpenko, V. S., & Kudrytskyi, O. V. Study of the influence of the catalyst on the biomass gasification process. *Energy: economy, technologies, ecology*. 2016. No. 4. R. 17-24.
9. Burlaka S.A. Algorithm of operation of a machine-tractor unit using a power supply system with a fuel mixer. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*. Series: Technical sciences. 2022. No. 1 (305). P. 140-144.
10. Kucheryavy, V.V., & Kononova, O.V. Analysis of solid biofuel production technological schemes using mathematical modeling methods. *Scientific Bulletin of the International Humanitarian University*. Series: Technical sciences. 2017. No. 23. P. 58-61.
11. Burdeiniy, O. V., & Babenko, O. V. Biofuel production technologies: world and Ukrainian experience. *Energy and electrification*. 2015. No. 4. P. 5-10.
12. Mykytyuk, Yu. V., & Piddubny, Yu. V. Analysis of the solid biofuel market in Ukraine. *Economics and forecasting*. 2019. No. 1. P. 87-98.