

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА АЛЬТЕРНАТИВНА ЕНЕРГЕТИКА

УДК 662.8:674.038.19

[https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2025-2-37\(51\)-15](https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2025-2-37(51)-15)

АНАЛІЗ ШКІДЛИВИХ ВИРОБНИЧИХ ЧИННИКІВ І ЗАХОДИ БЕЗПЕЧНОЇ РОБОТИ НА ВИРОБНИЦТВІ БІОПАЛИВНИХ БРИКЕТІВ

Єременко О., канд. техн. наук, доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-3377-0015>,

Войналович О., канд. техн. наук, доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-9321-2672>,

Поліщук В., д-р техн. наук, професор,

<https://orcid.org/0000-0002-9654-9051>,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація

Мета досліджень. Основною метою цієї наукової роботи є мінімізація негативного впливу шкідливих і небезпечних виробничих чинників на персонал, задіяний у процесах шнекового (екструдерного) брикетування вторинної рослинної біомаси. Досягнення цієї мети реалізується шляхом проведення комплексного аналізу фізико-хімічних явищ у ході підготовки сировини та безпосереднього пресування, ідентифікації критичних ризиків для здоров'я працівників, а також наукового обґрунтування та розробки системи техніко-технологічних і організаційних заходів для створення безпечного виробничого середовища.

Методи і матеріали. Об'єктом дослідження є технологічні операції виробництва твердого біоопалива (брикетів типу Pini-Kay) з відходів сільського господарства та деревообробки. Наукові дослідження базувалися на методах ідентифікації шкідливих чинників, оцінці ризиків за матричним методом згідно з державними стандартами та чинною нормативно-правовою базою України з охорони праці та пожежної безпеки. У роботі проаналізовано експлуатаційні характеристики обладнання: молоткових дробарок, сушарок, теплогенераторів, екструдерів і систем охолодження.

Результати. Установлено, що процес екструзії супроводжується поєднанням високого тиску (60-100 МПа) та екстремальних температур (до 350°C), що спричиняє термодеструкцію біомаси та виділення у повітря робочої зони небезпечних сполук: акролеїну, оксидів азоту, вуглецю та високодисперсного пилу. Концентрація пилу без належної вентиляції може сягати 125-1000 мг/м³, що значно перевищує ГДК. Визначено, що найбільш травмонебезпечними вузлами є екструдер, сушарка та торцювальний пристрій. Аналіз виробничого травматизму засвідчив, що 45% випадків становлять травми рук рухомими частинами, а 35% – термічні опіки. Доведено, що використання спеціальних присадок дає змогу знизити надлишковий тиск вибуху пилу з 6 кПа до 0,25 кПа, переводячи категорію приміщення з «Б» у «В». Розроблено схему технічних заходів, що складаються з установлення локальних витяжних пристроїв над зонами термообробки та використання автоматичних термодатчиків.

Висновки. Проведений аналіз підтверджує, що виробництво біопаливних брикетів належить до категорій із високим рівнем небезпеки через поєднання механічних, термічних і хімічних ризиків. Упровадження запропонованих комплексних заходів — від модернізації систем вентиляції та заземлення до обов'язкового використання термостійких засобів індивідуального захисту — є критично необхідним для запобігання професійним захворюванням (пневмоконіозам, бронхітам) і виробничому травматизму. Створення безпечних умов праці вимагає консолідації зусиль роботодавця у забезпеченні належного технічного стану ліній і суворого дотримання персоналом інструкцій з охорони праці.

Ключові слова: біомаса, брикетне виробництво, обладнання, небезпечні і шкідливі чинники, заходи, безпечна праця.



Вступ. Інтенсифікація паливо-енергетичного комплексу в нашій країні здійснюється на основі створення нової моделі, в якій передбачено підвищення енергетичної, економічної та екологічної безпеки. Водночас підвищується ефективність використання відновлюваного палива для виробництва теплової та електричної енергії. Одним із видів такого палива є тверде біопаливо з сировини рослинного походження, зокрема побічної продукції і відходів лісопереробної та сільськогосподарської промисловостей [Petlickaitė et al., 2022; Piskunova et al., 2022; Kowalski et al., 2022].

Біопаливні брикети підрозділяються за двома принципами: за сировиною: брикети з деревних відходів (стружка, тирса, лісових і деревообробних виробництв); брикети з аграрної біомаси; брикети з інших матеріалів (целюлоза, полімери, торф тощо); за способами пресування: гідравлічний спосіб (брикети RUF); ударний спосіб (брикети NESTRO); екструдерний спосіб (брикети Pini-Kau) [Гелетуха та ін., 2018; Piskunova et al., 2022].

Брикети з повздовжнім отвором у середині отримали назву австрійської фірми «Pini-Kau». Пресування біомаси виконується шнеком при одночасному нагріві філь'єри електричним нагрівачем, тобто поєднується високий тиск із термічною обробкою. Pini-Kau нарізається пристроями на відрізки 250–400 мм. Брикети Pini-Kau більш доцільно карбонізувати порівняно з іншими типами брикетів [Гелетуха та ін., 2018; Piskunova et al., 2022].

Брикетування біомаси є процесом зближення під дією зовнішніх сил органічних частинок, не пов'язаних між собою, з метою підвищення щільності і виникнення між ними зв'язку, що забезпечує міцність, більш високу теплотворність отриманих брикетів. Рослинна маса, що брикетується, складається з твердих частинок, вологи, пов'язаної з частками, і повітря між частинками. При цьому дисперсійним середовищем є тверді частинки, а дисперсійною фазою – повітря [Єременко та ін., 2020].

У процесі інтенсивного ущільнення відбуваються структурні зміни біомаси, що надходить у робочий орган брикетного пресу, зокрема витиснення повітря, деформації частинок, збільшення поверхні зіткнення між ними. Далі щільність біомаси збільшується до 1000–1200 кг/м³, вона набуває властивостей і характеристик монолітного тіла. Брикети, отримані методом шнекового пресування, мають на поверхні міцну корку, що важливо в умовах тривалого зберігання [Єременко та ін., 2020].

Одним із найважливіших питань на будь-якому підприємстві чи установі є забезпечення роботодавцем безпечних умов праці для працівників. Законодавством України розроблено ряд нормативно-правових актів і документів, які вимагають дотримання безпеки праці на виробництві [Закон України № 229-IV, 2002; Dreval et al., 2020].

Стан безпеки праці загалом відповідає нормам нормативних документів і чинного законодавства. Керівники підрозділів, безпосередньо відповідаючи за стан безпеки праці на підприємстві, в господарстві приділяють відповідну увагу стану безпеки праці.

Відповідно до Закону України «Про охорону праці» розробляються комплексні заходи для досягнення встановлених нормативів із безпеки праці. До них входять організаційно-технічні, санітарно-гігієнічні, соціально-економічні, лікувально-профілактичні, заходи з випробування прогресивних технологій, досягнень науки і техніки, засобів механізації та автоматизації виробництва, які сприяють вирішенню питань збереження здоров'я працівників у ході виконання виробничих завдань.

Комплексні заходи з безпеки праці розробляються на базі одержаних даних про стан безпеки праці на підприємстві та атестації робочих місць шляхом лабораторних досліджень і використовуються під час розробки поточних та оперативних планів.

Постановка завдань. Напрямок пла-

нування заходів з безпеки праці є вдосконалення виробничих процесів відповідно до вимог стандартів та інших вимог із безпеки праці, а також виробничого (енергосилового) обладнання, що відповідає вимогам до його підтримання у відповідному стані.

У господарствах здійснюється контроль за станом безпеки праці, який є основним заходом у виявленні потенційних виробничих небезпек на робочих місцях, порушень працівників чинних норм і правил, а посадовими особами – обов'язків із безпеки праці.

Типова лінія для виробництва біопаливних брикетів типу Pini-Kau складається з такого обладнання: бункера-накопичувача, скребкового або стрічкового транспортера, циклона, сушарки біомаси, дробарки, екструдера для формування брикетів, охолоджувача брикетів і торцювального пристрою [Гелетуша та ін., 2018; Єременко та ін., 2020; Yegemenko et al., 2025].

Функціонування обладнання забезпечує виробництво біопаливних брикетів, однак водночас утворюються шкідливі та небезпечні чинники, які негативно впливають на організм людини й навколишнє середовище [Цимбал та ін., 2018; Войналович, 2022; Piskunova et al., 2022].

Безпека праці на виробництві брикетів зосереджується на таких заходах: організації спеціального навчання і підвищенні кваліфікації обслуговуючого персоналу; розробці інструкцій з охорони праці на робочих місцях і попереджувальних та обмежувальних засобів; оформленні нарядів-допусків за певними вимогами; зменшенні шкідливої дії органічного пилу, загазованості топковими газами при роботі сушарки та продуктами часткового піролізу при виході брикетів із преса (алергени, канцерогени, двоокис вуглецю, оксиди азоту тощо), що вимагає ефективних систем витяжної вентиляції; безпечній експлуатації технологічного обладнання (сушарка, подрібнювач, конвеєри, прес ін.), застосуванні засобів індивідуального захисту (спеціальний одяг і

взуття, рукавички, окуляри, респіратори), аби уникнути травм і професійних захворювань, дотриманні правил пожежної безпеки для уникнення дії пожежонебезпечних чинників [Войналович та ін., 2013; Цимбал та ін., 2018; Войналович, 2022].

Мета роботи полягає у досягненні мінімізації впливу негативних чинників на працівників при шнековому брикетуванні біомаси у паливо шляхом аналізу технологічних процесів, розробці заходів і надання рекомендацій щодо безпечної праці.

Методи і матеріали. Об'єктом дослідження є технологічні процеси і операції виробництва паливних брикетів із вторинної біомаси. Предметом дослідження є небезпечні і шкідливі фактори на брикетному виробництві та заходи усунення імовірних небезпек виробничого середовища.

Методи досліджень: ідентифікація шкідливих і небезпечних факторів технологічних процесів брикетного виробництва; визначення ризиків згідно з державними стандартами та іншими законодавчими документами; проведення оцінки ризиків за матричним методом для здоров'я працівників; застосування нормативної бази у вигляді чинних нормативно-правових актів з охорони праці та пожежної безпеки.

Результати та обговорення. Сировина на вторинна біомаса має значний рівень абразивності та кислотності, що призводить до інтенсивного зношування шнека та філь'єри екструдера. Це явище сприяє збільшенню витрат на виробництво брикетів [Войналович та ін., 2013; Цимбал та ін., 2018].

При шнековому брикетуванні сировина піддається термічно-механічному впливу, рівень якого залежить від показника проходження біомаси робочими поверхнями. У зоні завантаження відбувається контактування попередньо подрібненої до 1-10 мм сировини, яка має низьку насипну щільність (наприклад, деревна тирса 150-200 кг/м³, лушпиння соняшника близько 120 кг/м³) [Гелетуша та ін., 2018; Єременко та ін., 2020; Фомич, 2023]. У зоні пресування металеві

поверхні шнека контактують з абразивними частинками біомаси, яка підлягає стисненню, деформації та ущільненню. Біомаса нагрівається внаслідок інтенсивного тертя об робочі поверхні та від нагрівача. В результаті виділяється лігнін, що сприяє утворенню в'язко-пластичного середовища. При виході зі шнекової камери ущільнена біомаса екстрагується у філь'єрі матриці. При цьому на поверхні брикету під впливом високої температури (деревної тирси 320-350°C, лузги соняшника 240-290°C) утворюється зольна плівка [Цимбал, 2015; Єременко та ін., 2020; Piskunova et al., 2022]. Під час спікання зовнішнього шару брикету виділяються у виробниче середовище такі хімічні сполуки, як акролеїн, діоксид азоту, діоксид вуглецю, рослинний пил, діоксид кремнію, які вступають у молекулярний контакт із матеріалом робочих органів. Окрім того, ці екологічно небезпечні чинники в поєднанні з лігніном унаслідок адсорбції, хемосорбції і дифузії атомів змінюють хімічний склад поверхні робочих органів. Під дією високої температури, звільненої вологи та впливу слабо-кислого середовища біомаси відбувається хімічна реакція на поверхні металу, яка провокує корозійне-механічне зношування. У результаті цього виникають вторинні структури, товщина яких коливається в межах 0,05-0,1 мкм. Як правило, це зношування характерне для зони екструзії та спікання, однак таке явище спостерігається в камері стиснення біомаси. Корозійне-механічне зношування відбувається у системі «біомаса–шнековий механізм» [Цимбал 2015; Єременко та ін., 2020].

У процесі брикетування під дією високої температури відбувається термодеструкція органічних речовин біомаси. Термодеструкція супроводжується утворенням агресивних (відносно до металу) хімічних речовини. При механічному диспергуванні біополімерів утворюються макро-радикали, які вступають в активну взаємодію з металами. Під час термодеструкції відбувається утворення поверхнево-активних речовин, дія яких супро-

воджується адсорбційним зниженням твердості та межі втоми [Цимбал 2015; Єременко та ін., 2020].

Аналіз небезпечних і шкідливих факторів проведено на провідному підприємстві ТОВ «ЧеркасиЕлеваторМаш» [Цимбал та ін., 2018]. Найбільш значимими ризиками є фізичні та хімічні небезпеки (таблиця 1).

Аналіз таблиці 1 свідчить, що найбільш небезпечними є екструдер для отримання брикетів, сушарка та торцювальний пристрій. До найбільш впливових факторів слід віднести підвищену запиленість і загазованість робочої зони, високу температуру поверхні обладнання та матеріалів.

Випадки фізико-механічного травмування у ТОВ «ЧеркасиЕлеваторМаш» під час роботи на брикетному обладнанні мають такі показники у відсотках:

- травмування пальців або кисті рук унаслідок захоплення робочими органами, що обертаються – 45;
- потрапляння до очей аерозольного пилу – 38;
- травмування при налагодженні обладнання чи демонтажу – 9;
- травмування частин тіла брикетом при різанні торців – 4;
- інші випадки травмування – 4.

Стан повітря робочої зони визначався згідно з технічною документацією відповідно до вимог [Наказ МОЗ України 2024]. Основним джерелом утворення пилу є робота дробарки, екструдера, торцювального пристрою. У повітря виділяється вискодисперсний пил (0,8-5 мкм), до складу якого, окрім органічних сполук, входять металеві та мінеральні частинки. Вміст пилу у повітрі може сягати 125-1000 мг/м³ при подрібненні без використання примусової вентиляційної системи.

У лінії виробництва брикетів відбуваються механічні та фізико-хімічні зміни структури біомаси. У повітря робочої зони надходить суміш парів, газів і аерозолів. Летючі продукти, що утворюються при тепловому розкладанні (термодеструкції) ряду органічних речовин, є пожежонебезпечними, токсичними та мо-

Таблиця 1 - Фізичні та хімічні фактори небезпек, характерні для обладнання лінії виробництва паливних брикетів із біомаси

| Назва обладнання Фактори небезпеки | Бункер-накопичувач | Транспортер | Циклон | Сушарка | Дробарка | Екструдер | Охолоджувач | Торцювальний пристрій |
|---|--------------------|-------------|--------|---------|----------|-----------|-------------|-----------------------|
| Гострі краї обладнання, інструмента | | | | | + | | | + |
| Підвищена запиленість і забрудненість повітря | + | + | | | + | + | + | + |
| Гарячі або холодні місця повітря робочої зони | + | | + | + | | + | + | |
| Підвищена температура поверхні обладнання | | | | + | + | + | | + |
| Підвищений рівень шуму на робочому місці | | + | + | | + | + | | + |
| Підвищений рівень вібрації на робочому місці | | + | + | + | + | + | | + |
| Підвищене значення напруги в електромережі (замикання може відбутися через тіло працівника) | | + | + | + | + | + | | + |
| Підвищений рівень статичної електрики | | + | + | + | + | + | | + |
| Підвищений рівень електромагнітного випромінювання | | | | + | + | + | | + |
| Токсичні і подразнювальні речовини | | | | + | | + | + | |

жуть викликати зміни центральної нервової і судинної систем, внутрішніх органів, створювати шкірно-трофічні порушення. Тривале вдихання пилу призводить до розвитку пилових захворювань бронхо-легеневого апарату – пневмоконіозів і хронічного пилового бронхіту. Також вдихання пилу і шкідливих газів призводить до захворювання бериліозом [Voinalovych, Marchyshyna, 2019; Наказ МОЗ України, 2024]. Показники за вмістом пилу у повітрі робочої зони наведено у таблиці 2.

Хімічний склад повітря та вміст димових газів, які утворюються при піролізі біомаси, майже не залежить від типу сировини. У процесі піролізу 1 м³ біомаси утворюється 80-95 м³ газів, із яких метан і кисень утворюють вибухонебезпечну суміш. Повітря в робочій зоні має підвищену температуру димових газів 70-255°C і такий склад газів у відсотках (%): оксид сірки 10-16; оксид азоту 9-16; кисень 8-15; метан 0-0,01; діоксид вуглецю 5-9 [Цимбал та ін., 2018; Voinalovych, Marchyshyna, 2019].

Рівень шуму на робочих місцях вимірювався відповідно до державних санітарних вимог [ДСН 3.3.6.037-99]. Спектри

Таблиця 2 - Вміст пилу у повітрі при брикетуванні залежно від виду сировини

| Перероблювальна сировина | Вміст пилу, мг/м ³ |
|--------------------------|-------------------------------|
| Лушпиння соняшнику | 800-1000 |
| Деревна тирса | 500-554 |
| Солома ячменю | 126-238 |

шуму більшості обладнання лінії для виробництва паливних брикетів із рослинної біомаси мають середній і високочастотний характер. Загальні рівні звукового тиску знаходяться в межах від 85 до 100 дБА. Найбільш високі рівні спостерігаються в робочій зоні дробарки, екструдера та торцювального пристрою. Рівень звукової потужності на робочому місці оператора не повинен перевищувати гранично допустимий рівень 80 дБА, тобто необхідно вживати заходів безпеки для зменшення дії цього фактору.

Під час виробництва брикетів із біомаси трапляються опіки шкіри працівника, причиною яких є гаряча поверхня теплогенератора сушарки, дробарки, екструдера та торцювального пристрою. Особливо небезпечними є поверхня формувальної

головки екструдера та паливні брикети після екструзії, які можуть тліти і є пожежонебезпечними. Температура робочих органів екструдера та брикетів безпосередньо після екструзії залежно від виду сировини наведена у таблиці 3.

Також ймовірні опіки, якщо вологість сировини перевищує 8 %. Це пов'язано з тим, що під час екструзії утворюються парові пробки, сировина вилітає з головки екструдера та травмує працівників. Технічне обслуговування екструдера та пакування брикетів заборонено, якщо їхня температура перевищує 40°C. Під час екструзії під великим тиском і при високій температурі відбувається термічна деструкція, піроліз поверхні паливних брикетів [Цимбал та ін., 2018; Piskunova et al., 2022].

За результатами проведеного аналізу доцільно застосовувати низку заходів безпеки на брикетному виробництві. У поточних лініях брикетування при зупинці будь-якого устаткування слід зупинити все попереднє обладнання, якщо лінії не оснащені накопичувачами або відсутні буферні майданчики. Над гарячим брикетним пресом і в місцях охолодження гарячих брикетів необхідна установка укриття з місцевими витяжними пристроями (рис. 1).

Гарячий брикетний прес та інше обладнання, що інтенсивне виділяє тепло, повинно бути оснащене знаками безпеки та екранами, щоб інтенсивність теплового випромінювання на робочих місцях не перевищувала 100 Вт/м² [ДСТУ EN ISO 7010:2019].

З метою експрес-аналізу певної партії

Таблиця 3 – Температура робочих органів екструдера та брикетів після екструзії

| Тип сировини | Температура обробки, °C |
|--------------------|-------------------------|
| Деревні залишки | 320-350 |
| Лушпиння соняшника | 250-290 |

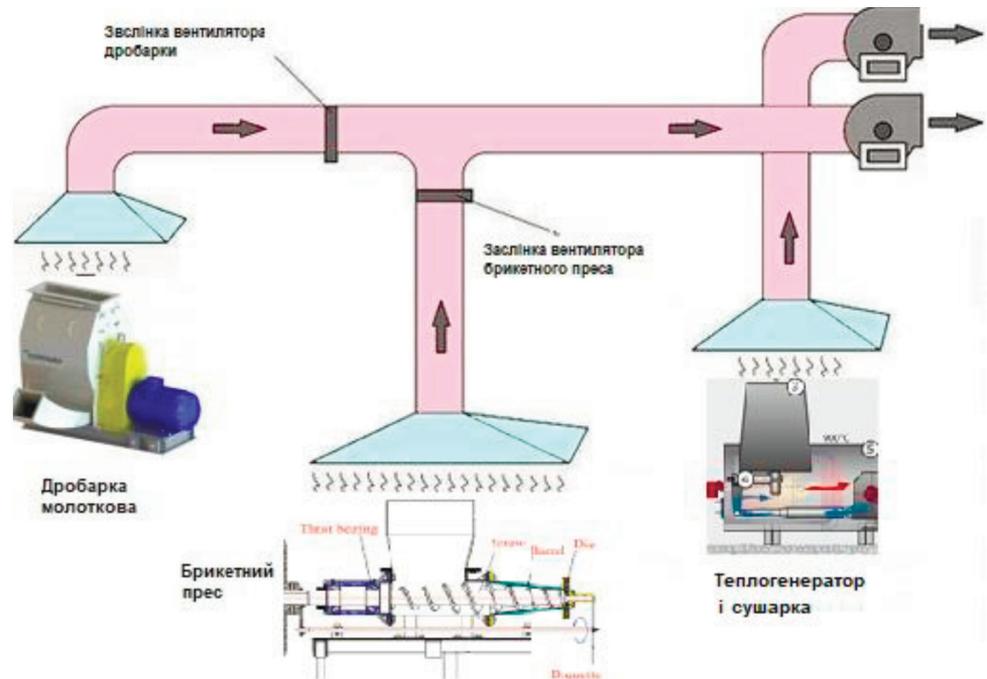


Рисунок 1 – Схема техніко-технологічних заходів для зниження впливу небезпечних і шкідливих чинників на брикетному виробництві

біопаливних брикетів під час виготовлення потрібно отримати зразки. Для цього необхідно використовувати жароміцні кліщі, які мають форму профілю брикету (коло, шестикутник, чотирикутник тощо) та ручку з жароміцного матеріалу. У зоні екструзії та охолодження необхідно встановити витяжку для виведення з робочої зони повітря, яке містить дим і пил (рис. 1). Повітря має пройти очищення крізь змонтовані тканинні фільтри, скрубери або електрофільтри.

Для попередження опіків під час технічного обслуговування екструдера, сушарки чи торцювального пристрою потрібно встановлювати термодатчики, які автоматично контролюють температуру на робочих органах та в місцях обслуговування. Спеціальний одяг і взуття, рука-

Таблиця 4 – Склад диму й пилу при виробництві паливних виробів

| Назва речовини, яка визначається | Швидкість аспірації, л/хв. | Час відбору проб, хв. | Фактична концентрація, мг/м ³ | Гранично допустима концентрація, мг/м ³ | Методика дослідження |
|----------------------------------|----------------------------|-----------------------|--|--|----------------------|
| Акролеїн | 0,5 | 20 | 0,5 | 0,2 | МУ 2719-83 |
| Діоксид азоту | 0,2 | 5 | 3,5 | 2 | МУ 1638-77 |
| Діоксид вуглецю | 0,2 | 5 | 19,0 | 20 | ТОІЕ АПИ 2.840.087 |
| Пил рослинного походження | 20,0 | 30 | 10,0 | 6 | МУ 4436-87 |
| Діоксид кремнію | 20,0 | 30 | 2,0 | - | МУ 2391-81 |

виці, окуляри, респіратор для працівників мають бути виготовлені з термостійких матеріалів для захисту від потрапляння іскор, гарячого пилу й диму під час виробництва у зоні екструзії [Цимбал та ін., 2018]. Склад цих небезпечних чинників наведений у таблиці 4.

З таблиці 4 зрозуміло, що під час виробництва паливних виробів у зоні екструзії утворюються сполуки, рівень яких перевищує гранично допустиму концентрацію та які негативно впливають як на організм працівника, так і на навколишнє середовище.

Розрахунок надлишкового тиску вибуху для горючого пилу проводився згідно з вимогами ДСТУ Б В.1.1-36:2016 за формулою:

$$\Delta P = \frac{m H_T P_o z}{V_{\text{віль}} \rho_E c_p T_o k_H}, \quad (1)$$

де m – маса горючого пилу, кг;

H_T – теплота згоряння, Дж кг⁻¹;

P_o – атмосферний тиск, кПа (приймаємо 101,3 кПа);

z – розуміється частка участі зависло-го горючого пилу у вибуху за відсутності експериментальних даних про величину z ; приймаємо $z = 0,5$;

$V_{\text{віль}}$ – вільний об'єм приміщення, м³;

ρ_E – густина повітря до вибуху за початкової температури T_o , кг/м³;

c_p – теплоємність повітря, Дж·кг⁻¹·К⁻¹ (приймаємо такою, що дорівнює 1,01·10³ Дж·кг⁻¹·К⁻¹);

T_o – початкова температура повітря, К.

Використання способу [Voinalovych et al., 2025] отримання твердого палива з рослинної сировини та присадки дало змогу перевести небезпеку виробництва з категорії Б (пожежовибухонебезпечне) в категорію В (пожежонебезпечне), знизивши надлишковий тиск горючого пилу з 6 кПа до 0,25 кПа, який був розрахований за формулою (1).

При виробництві твердих видів біопалива для забезпечення дрібного і тонкого подрібнення рослинних матеріалів до розмірів частинок 1-10 мм широкого розповсюдження набули подрібнювачі ударної дії, зокрема молоткові і роторні дробарки, дезінтегратори тощо [Polishchuk et al., 2021]. Водночас експлуатація та обслуговування такого обладнання супроводжується виникненням небезпечних чинників: механізми, що швидко обертаються, підвищений шум і вібрація, електрична та пожежна небезпека, пилоутворення тощо.

Технологічне обладнання і пневмопроводи вентиляції у пожежонебезпечних приміщеннях відносяться до категорій Б, В і належать до обов'язкового заземлення не менше, ніж у 2-х місцях із вирівнюванням потенціалів до безпечних величин.

Системи вентиляції сприяють розповсюдженню пожежі, оскільки мають значну протяжність повітряних комунікацій (рис. 1), переходять через протипожежні перешкоди споруд. При пожежі у похилих галереях або вертикальних шахтах виникає сильна тяга, що сприяє інтенсивному розповсюдженню пожежі.

Запропоновані загальні заходи безпеки

праці на виробництві паливних брикетів із біомаси екструдерним (шнековим) способом можна класифікувати на фізичні фактори, шкідливі (санітарно-гігієнічні) виробничі фактори, пожежну та вибухову небезпеку, психофізіологічні фактори.

Фізичні небезпечні фактори включають у себе рухомі машини та механізми (небезпека травмування відкритими частинами подрібнювачів (дробарок), шнекові преси (екструдерів), транспортерні стрічки, торцювальні пристрої; підвищену температуру поверхонь і ризик термічних опіків (процес пресування відбувається при нагріванні сировини до 250-350°C, робота теплогенераторів і сушарок); підвищений рівень шуму та вібрації (робота електродвигунів, подрібнювачів і вентиляційних систем); електричний струм (ризик ураження при несправності заземлення або ізоляції обладнання, що працює під високою напругою).

Шкідливі (санітарно-гігієнічні) виробничі фактори – виробничий пил (дрібна фракція вторинної біомаси подразнює слизові оболонки, викликає респіраторні захворювання (астму, бронхіт), спричиняє дерматити при тривалому контакті зі шкірою); хімічні речовини та гази (при термічній обробці біомаси (сушінні, екструзії) можуть виділятися оксиди вуглецю, азоту (CO_x , NO_x), акролеїн, смоли, що призводять до запаморочення та отруєнь); мікроклімат (підвищена температура та вологість у виробничому середовищі).

Пожежна та вибухова небезпека полягає в тому, що дрібнодисперсний пил біомаси у суміші з повітрям може утворювати пожежовибухонебезпечне середовище.

Психофізіологічні фактори включають у себе фізичні перевантаження (переміщення за зміну великої кількості сировини або готової продукції (фасування, складування)) та монотонність (одноманітність операцій при обслуговуванні технологічних ліній).

Для мінімізації впливу небезпечних і шкідливих чинників обов'язковим є використання засобів індивідуального і колективного захисту: респіраторів (FFP2/

FFP3), рукавиць, захисних окулярів, навушників, спецодягу, спецвзуття, а також забезпечення ефективної припливно-втяжної вентиляції.

Висновки. Проведений аналіз небезпечних і шкідливих чинників та оцінка ризиків небезпечного виробництва біопаливних брикетів необхідні для розробки і впровадження заходів зі зменшення дії на організми працівників небезпечних факторів, які можуть призвести до гострих отруєнь, нещасних випадків та аварій на виробництві.

Систематичне поліпшення умов праці на виробництві біопаливних брикетів та зменшення шкідливої дії фізичних, хімічних та інших чинників виробничого середовища є запорукою попередження виробничих травм, нещасних випадків, професійних захворювань, аварій. Створити безпечне виробниче середовище можливо за умови консолідації зусиль роботодавця, трудового колективу і кожного працівника.

Перелік літератури

Войналович, О. В. (2022). Засади охорони праці у схемах, таблицях і графіках: навчальний посібник. Київ: Основа. 219 с.

Войналович, О. В., Єременко, О. І., Кофто, Д. Г. (2013). Аналіз потенційних небезпек на пелетних виробництвах та заходи профілактики. Міжвідомчий наук. збірник Мех. та електр. сіль. госп-ва. Вип. 97. Т. 2. Глевах: ННЦ ІМЕСГ. 51-58.

Войналович, О., Мотрич, М., Єременко, О. (2025). Оцінення допустимого ризику експлуатації мобільної сільськогосподарської техніки після тривалого використання. Наукові доповіді XXV Міжнародної наукової конференції «Науково-технічні засади розроблення, випробування та прогнозування сільськогосподарської техніки і технологій», присвяченої пам'яті академіка Л. Погорілого, 26 вересня 2025 року. Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. 12-16. <https://www.ndipvt.com.ua/tez/zbt2025.pdf>

Гелетуха, Г. Г., Железна, Т. А., Драгнєв, С. В. (2018). Аналіз можливостей виробництва та використання брикетів з агробіомаси в Україні. Аналітична записка БАУ, № 20. 48 с. URL: www.uabio.org/activity/uabio-analytics.

ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Постанова МОЗ України від 1.12.1999 № 37. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va037282-99/stru>

ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Київ: Мінрегіон України, 2016. 60 с. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759

ДСТУ Б В.2.8-43:2011 Огородження інвентарні будівельних майданчиків та ділянок. Виконання будівельно-монтажних робіт. Технічні умови. Київ: Мінрегіон України, 2012. V, 9 с. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_2_8_43/5-1-0-1928

ДСТУ EN ISO 7010:2019 Графічні символи. Кольори та знаки безпеки. Зареєстровані знаки безпеки. Наказ Державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» від 24.06.2019 № 174. 131 с. URL: <https://rozhezhni-systemy.org.ua/wp-content/uploads/2025/11/dstu-en-iso-7010-2019.pdf>

Єременко, О. І., Василенков, В. Є., Руденко, Д. Т. (2020). Дослідження процесу брикетування біомаси шнековим механізмом. Інженерія природокористування. Харків: № 3 (17). 15–22. [https://doi.org/10.37700/enm.2020.3\(17\).15-22](https://doi.org/10.37700/enm.2020.3(17).15-22).

Закон України № 229-IV від 21.11.2002. Про внесення змін до Закону України «Про охорону праці». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/229-15/doc#Text>

Наказ МОЗ України, (2024). Наказ Міністерства охорони здоров'я України «Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони», від 09.07.2024 №

1192. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1107-24#n9>

Фомич, М. І. (2023.) Технології та обладнання для виготовлення паливних брикетів. Сільськогосподарські машини. № 46, 53–59. URL: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32/article/view/1020/992>.

Цимбал, Б. М. (2015). Розробка методики та визначення активної та загальної кислотності поверхонь паливних брикетів з деревинних відходів, які контактують з робочим органами преси. Вісник Харківського національного технічного університету сіль. госп-ва ім. академіка П. Василенка. Харків: ХНТУСГ. Вип. 160. 202-209.

Цимбал, Б. М., Войтов, В. А., Артем'єв, С. Р., Малько, О. Д., Шароватова, О. П. (2018). Підвищення ефективності виконання заходів з охорони праці та екологічної безпеки під час експлуатації шнекових екструдерів: монографія. Харків: НУЦЗ України. 172 с.

Dreval, Yu. D., Zaika, S. O., Sharovato-va, O. P., Bryhada, O. V., Tsybmal, B. M. (2020). Fundamental principles of activity of international labour organization in occupational safety and hygiene. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, No.6. 89-95. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/089>.

Kowalski, Z., Kulczycka, J., Verhé, R., Desender, L., De Clercq, G., Makara, A., ... & Harazin, P. (2022). Second-generation biofuel production from the organic fraction of municipal solid waste. *Frontiers in Energy Research*, 10, 919415. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.919415>

Petlickaitė, R., Jasinskas, A., Mioldažys, R., Romaneckas, K., Praspaliauskas, M., & Balandaitė, J. (2022). Investigation of pressed solid biofuel produced from Multi-Crop biomass. *Sustainability*, 14(2), 799. <https://doi.org/10.3390/su14020799>

Piskunova, L. E., Yeremenko, O. I., Zubok, T. O., Serbeniuk, H. A., Korzh, Z. V. (2022). Scientific and methodological aspects of solid biofuel production processes in compliance with labor protection and environmental safety measures. *Polityka ener-*

getyczna – energy policy Journal. Volume 25. Issue 1. 143-154. <https://doi.org/10.33223/epj/144008>.

Polishchuk, V. M., Derevianko, D. A., Dvornyk, Ye. O. (2021). Efficiency of Production and Application of Solid Fuels in Rural Areas. *Machinery and Energetics*. 12 (1). 31–38. doi: 10.31548/machenergy2021.01.031.

Voinalovych, O. V., Marchyshyna, Ye. I. (2019). Occupation safety and health in agriculture: educational manual. Київ: Центр учбової літератури. 424 с.

Voinalovych, O., Yeremenko, O., Zubok, T., Motruch, M. (2025). Components of the system for identification and assessment of occupational risks in agricultural enterprises. Proceedings of 24th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”, May 21-23, 2025, Jelgava, Latvia. 185-191. DOI: 10.22616/ERDev.2025.24.TF033.

Yeremenko, O. I. (2020). Research of advanced crusher wood biomass for solid fuel production. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv: Ukraine. Vol. 11, No 1, 105-113. <https://doi.org/10.31548/machenergy.2020.01.105-113>

Yeremenko, O., Maidanovych, V., Subota, S., Zubok, T. (2025). Influence of pressing modes on quality indicators of briquettes from straw materials and grain waste. Proceedings of 24th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”, May 21-23, 2025, Jelgava, Latvia. 913-918. DOI: 10.22616/ERDev.2025.24.TF189.

References

Dreval, Yu. D., Zaika, S. O., Sharovato-va, O. P., Bryhada, O. V., Tsymbal, B. M. (2020). Fundamental principles of activity of international labour organization in occupational safety and hygiene. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, No.6. 89-95. <https://doi.org/10.33271/nvn-gu/2020-6/089>.

DSTU B V.1.1-36:2016 Determination of categories of premises, buildings and ex-

ternal installations according to explosion and fire hazard. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2016. 60 p. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759

DSTU B V.2.8-43:2011 Inventory fencing of construction sites and areas. Execution of construction and installation works. Technical conditions. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2012. V, 9 p. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_2_8_43/5-1-0-1928

DSTU EN ISO 7010:2019 Graphic symbols. Colors and safety signs. Registered safety signs. Order of the State Enterprise «Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality» dated 24.06.2019 No. 174. 131 p. URL: <https://pozhezni-systemy.org.ua/wp-content/uploads/2025/11/dstu-en-iso-7010-2019.pdf>

Fomich, M. I. (2023). Technologies and equipment for the production of fuel briquettes. *Agricultural machinery*, No 46, 53-59. URL: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32/article/view/1020/992>.

Geletukha, G. G., Zhelezna, T. A., Dragnev, S. V. (2018.) Analysis of the possibilities of production and use of briquettes from agrobiomass in Ukraine. Analytical note of the Bioenergy Association of Ukraine, No.20. 48 p. URL: <https://uabio.org/activity/271/>.

Law of Ukraine On Amendments to the Law of Ukraine «On Labor Protection» dated 21.11.2002 No. 229-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/229-15/doc#Text>

Order of the Ministry of Health of Ukraine “On approval of state medical and sanitary standards for the permissible content of chemical and biological substances in the air of the working zone”, dated 09.07.2024 No. 1192. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1107-24#n9>

Piskunova, L. E., Yeremenko, O. I., Zubok, T. O., Serbeniuk, H. A., Korzh, Z. V. (2022). Scientific and methodological aspects of solid biofuel production processes in compliance with labor protection and environmental safety measures. *Polityka energetyczna – energy policy Journal*. Volume 25. Issue 1. 143-154. <https://doi.org/10.33223/>

epj/144008.

Polishchuk, V. M., Derevianko, D. A., Dvornyk, Ye. O. (2021). Efficiency of Production and Application of Solid Fuels in Rural Areas. *Machinery and Energetics*. 12 (1). 31–38. doi: 10.31548/machenergy2021.01.031.

State Sanitary Standards 3.3.6.037-99 Sanitary Standards for Industrial Noise, Ultrasound and Infrasound. Resolution of the Ministry of Health of Ukraine dated 1.12.1999 No. 37. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va037282-99/stru>

Tsymbal B.M. (2015). Development of a methodology and determination of the active and total acidity of the surfaces of fuel briquettes from wood waste that are in contact with the working bodies of the press. *Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Academician P. Vasylenko*. Kharkiv: KhNTUSG. Issue 160. 202-209.

Tsymbal, B. M., Voitov, V. A., Artem'iev, S. R., Malko, O. D., Sharovatova, O. P. (2018). Increasing the effectiveness of occupational health and environmental safety measures during the operation of screw extruders: monograph. Kharkiv: National University of Civil Defense of Ukraine. 172 p.

Voinalovych, O. V. (2022). Principles of occupational health and safety in diagrams, tables and graphs: a textbook. Kyiv: Osnova. 219 p.

Voinalovych, O. V., Marchyshyna, Ye. I. (2019). Occupation safety and health in agriculture: educational manual. Kyiv: Educational Literature Center. 424 p.

Voinalovych, O. V., Yeremenko, O. I., Kofto, D. G. (2013). Analysis of potential hazards in pellet production and preventive measures. *Interdepartmental scientific collection Mech. and electrical. agricultural*. Issue 97. Vol. 2. Glevakha: NNC IMESG. 51-58.

Voinalovych, O., Motrych, M., Yeremenko, O. (2025). Assessment of the permissible risk of operating mobile agricultural machinery after prolonged use. *Scientific reports of the XXV International Scientific Conference “Scientific and Technical Principles of Development, Testing and Forecasting of Ag-*

ricultural Machinery and Technologies”, dedicated to the memory of Academician L. Pogorilyy, September 26, L. Pogorilyy UkrNIIPVT. 12-16. <https://www.ndipvt.com.ua/tez/zbt2025.pdf>

Voinalovych, O., Yeremenko, O., Zubok, T., Motruch, M. (2025). Components of the system for identification and assessment of occupational risks in agricultural enterprises. *Proceedings of 24nd International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”*, May 21-23, 2025, Jelgava, Latvia. 185-191. DOI: 10.22616/ERDev.2025.24.TF033.

Yeremenko, O. I. (2020). Research of advanced crusher wood biomass for solid fuel production. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv: Ukraine. Vol. 11, No 1, 105-113. <https://doi.org/10.31548/machenergy.2020.01.105-113>

Yeremenko, O. I., Vasylenkov, V. Ye., Rudenko, D. T. (2020). Research of the process of biomass briquetting by a screw mechanism. *Environmental Engineering*. Kharkiv: No.3(17). 15–22. [https://doi.org/10.37700/enm.2020.3\(17\).15-22](https://doi.org/10.37700/enm.2020.3(17).15-22).

Yeremenko, O., Maidanovych, V., Subota, S., Zubok, T. (2025). Influence of pressing modes on quality indicators of briquettes from straw materials and grain waste. *Proceedings of 24nd International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”*, May 21-23, 2025, Jelgava, Latvia. 913-918. DOI: 10.22616/ERDev.2025.24.TF189.

*Надійшла до редакції 01.10.2025 р.;
переглянуто 31.10.2025 р.;
прийнято до друку 17.11.2025 р.
опубліковано 29.12.2025 р.*

*Received September 01, 2025;
revised October 31, 2025;
accepted November 17, 2025;
published December 29, 2025*