



<http://fasu.nltu.edu.ua>
<https://doi.org/10.36930/412619>
Article received 2025.10.15
Article revised 2026.03.12
Article accepted 2026.03.19
Article published 2026.05.22

ISSN 1991-606X print
ISSN 2616-5015 online
@ ✉ Correspondence author
Ruslan Kozak
kozak_r@nltu.edu.ua
103 General Chuprynka St.,
Lviv, 79057, Ukraine

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



УДК 674.815:631.572

Емісія формальдегіду з легких стружкових плит з вмістом стружки зі стебел соняшника та міскантуса

Р.О. Козак¹, В.С. Бірук²

Досліджено вплив стружки зі стебел соняшника та міскантуса на емісію вільного формальдегіду з легких тришарових стружкових плит. Актуальність дослідження зумовлена посиленням екологічних вимог до деревинних композиційних матеріалів та необхідністю зменшення використання деревинної сировини у виробництві плит. Мета роботи полягала у встановленні впливу на показники емісії формальдегіду часткової та повної заміни деревинної стружки у внутрішньому шарі легких стружкових плит стружкою зі стебел соняшника та міскантуса. У лабораторних умовах виготовлено тришарові стружкові плити щільністю 550 кг/м³ з різним вмістом агросировини у внутрішньому шарі. Для склеювання використано клей на основі карбамідоформальдегідної смоли. Визначення емісії вільного формальдегіду проводили методом газового аналізу відповідно до вимог EN ISO 12460-3. Встановлено, що використання стружки зі стебел соняшника та міскантуса сприяє зниженню емісії формальдегіду порівняно з контрольними плитами, виготовленими виключно з деревинної стружки. Найнижчий показник емісії формальдегіду отримано для плит зі 100% стружки зі стебел соняшника у внутрішньому шарі – 2,32 мг/(м²·год), що на 23,93% нижче порівняно з контрольними зразками. Для плит зі 100% стружки міскантуса середній показник емісії формальдегіду становив 2,76 мг/(м²·год), що на 9,51% нижче від контрольних плит. Комбіноване використання стружки зі стебел соняшника і міскантуса також сприяло зменшенню виділення формальдегіду. Усі дослідні зразки, включно з контрольними, відповідали вимогам класу емісії формальдегіду E1. Зниження емісії формальдегіду пояснюється особливостями будови лігноцелюлозної сировини, меншою її щільністю та формуванням більш щільної структури плит із меншою пористістю. Використання стебел соняшника та міскантуса у виробництві легких

¹ Козак Руслан Олегович – член-кореспондент Лісівничої академії наук України, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: kozak_r@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1297-9810>

² Бірук Володимир Сергійович – аспірант кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: +38-097-730-58-53. E-mail: volodymyr.biruk@nltu.edu.ua ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-7425-0769>

стружкових плит дає змогу розширити сировинну базу, зменшити споживання деревини та підвищити екологічну безпечність плитних матеріалів.

Ключові слова: екологічність стружкових плит; легкі композити; формальдегідовмісні смоли; агросировина; лігноцелюлозні матеріали; деревоощадні технології.

Вступ (Introduction)

Значну частину сучасних меблів, елементів внутрішнього оздоблення та будівельних виробів виробляють зі стружкових плит (СП). Оскільки більшість стружкових плит виготовляють з використанням карбамідоформальдегідних та інших формальдегідовмісних термореактивних смол, такі вироби здатні виділяти у навколишнє середовище вільний формальдегід (Frihart et al., 2020). У зв'язку з широким застосуванням СП у закритих приміщеннях, проблема емісії формальдегіду набуває особливого значення з погляду безпеки для здоров'я людини.

У 2004 р. Міжнародне агентство з вивчення раку (IARC) дійшло висновку щодо канцерогенності формальдегіду для людини на підставі встановленого зв'язку між впливом формальдегіду та підвищеним ризиком розвитку онкологічних захворювань, зокрема раку носоглотки та лейкемії. Відповідно до Регламенту Європейського Союзу №1272/2008 «Про класифікацію, маркування та пакування речовин і сумішей» (CLP), з 2016 р. формальдегід класифікується одночасно як канцероген категорії 1B та мутаген категорії 2. Це означає, що речовина вважається потенційно канцерогенною для людини, яка здатна спричиняти спадкові генетичні зміни. Таким чином виділення вільного формальдегіду з меблевих виробів і деревинних композитів, особливо в умовах обмеженої вентиляції приміщень, становить серйозну екологічну проблему.

Європейське агентство з хімічних речовин (ECHA) продовжує проводити дослідження, спрямовані на оцінювання ризиків використання формальдегіду та пов'язаних з ним речовин, що стало підґрунтям для поступового посилення нормативних вимог у країнах Європейського Союзу. Аналогічної позиції дотримується і Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ). Як наслідок очікується, що з 6 серпня 2026 р. в Європейському Союзі набудуть чинності нові вимоги щодо граничного рівня емісії формальдегіду для деревинних плит та виробів з них – клас E 0,5 із допустимим рівнем емісії у два рази нижчим порівняно з чинним класом E1, в якого допустимий рівень емісії становить 3,5 мг/(м²·год).

У роботах Kristak et al. (2022) та Chrobak et al., (2022) зазначено, що на сьогоднішній день традиційні синтетичні клеї, які використовують у виробництві СП, переважно виготовляють на

основі сполук карбаміду, меламіну та фенолу з формальдегідом і належать до формальдегідовмісних смол. Серед них основними клеями у виробництві стружкових плит вже понад пів століття залишаються саме карбамідоформальдегідні (КФ) смоли. Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених розробленню екологічно безпечніших клеїв, зокрема на основі лігніну, танінів та білкових систем (Bekhta & Sedláček 2019; Ferdosian et al., 2017; Hemmilä et al., 2017), КФ смоли досі домінують у промисловості завдяки низькій вартості, високій реакційній здатності, короткому часу пресування та задовільним фізико-механічним властивостям плит (Pizzi et al., 2020). Саме тому сучасні тенденції розвитку плитної промисловості спрямовані на зменшення емісії формальдегіду шляхом оптимізації рецептур клеїв, використання альтернативних в'язучих, а також пошуку нових видів сировини, здатної впливати на процеси зв'язування та вивільнення формальдегіду у структурі плит. Особливо цікавим є підхід з використанням нових видів сировини, оскільки, окрім покращення екологічності СП, використання нетрадиційних матеріалів сприятиме вирішенню проблеми дефіциту деревини. Такими матеріалами можуть стати лігноцелюлозні сільськогосподарські рослини. Виробництво легких СП з вмістом лігноцелюлозних сільськогосподарських відходів дасть змогу зменшити використання деревини, знизити собівартість плит та покращити їхню екологічність (Ikubanni et al., 2025; Lee et al., 2022).

У роботі Kara (2025) досліджено вплив стружки з однорічних конопель (*Cannabis sativa* L.) на властивості СП. З цією метою до середнього шару зразків СП додавали конопляну стружку у різних кількостях: 10, 20 і 30%. Як в'язучий компонент використовували КФ смоли в кількості 7% та 12% від маси стружки у середньому та зовнішньому шарах відповідно. Зразки пресували на гідравлічному пресі за температури 195±5°C, тиску 3,0 МПа і тривалості 300 с. Зразки виготовляли розмірами 550 × 550 × 19 мм та щільністю 580 кг/м³. За результатами випробувань зроблено висновок, що конопляна стружка крім того, що позитивно впливає на механічні властивості СП, має значний вплив на емісію вільного формальдегіду. Найнижче значення вмісту вільного формальдегіду було зафіксовано в зразках з 20%-ним заміщенням – 2,91 мг/100 г, що показало зниження вмісту формальдегіду на 24,6% порівняно з контрольним зразком з деревинної

стружки. Найвище значення – 3,86 мг/100 г було зафіксовано в плит, виготовлених без використання конопляної стружки, що пояснюється утриманням вільного формальдегіду в плитах з конопляною стружкою через підвищення міцнісних властивостей плит.

У роботі Keskin et al. (2015) проаналізовано потенціал лушпиння маку (*Papaver somniferum* Linnaeus) як сировини для виробництва СП. Виготовляли тришарові СП з цільовою щільністю 680 кг/м³. Для склеювання використовували КФ смоли. Деревину замінювали у середньому та зовнішніх шарах з інтервалом від 25% до 100%. Емісію вільного формальдегіду досліджували згідно EN 717-1. Найнижчі значення емісії формальдегіду були отримані в СП, виготовлених виключно з використанням макового лушпиння. Показники емісії також знижувалися зі збільшенням частки макового лушпиння в матриці плити від 84,3 ppm (плити з 100% деревини) до 60,00 ppm (плити з 100% лушпиння маку). Такі роботи підтверджують доцільність використання недеревних лігноцелюлозних матеріалів задля зменшення емісії вільного формальдегіду у СП.

Соняшник є однією із найпоширеніших сільськогосподарських культур у світі та має важливе стратегічне значення для аграрного сектору України. Після збору врожаю утворюються значні обсяги стеблових залишків, які переважно не використовують, а переважно спалюють, що створює додаткове екологічне навантаження. Водночас стебла соняшника розглядають як перспективну сировину для виробництва композиційних матеріалів завдяки низькій щільності, розвиненій пористій структурі та високому вмісту целюлози (Bekhta et al., 2023).

Значну увагу науковців також привертає міскантус як високопродуктивна енергетична культура зі значним потенціалом отримання лігноцелюлозної біомаси. Міскантус характеризується швидким ростом, низькими вимогами до умов вирощування та високою врожайністю рослинної маси. Завдяки цим властивостям, його дедалі частіше розглядають як альтернативну сировину для виготовлення деревинних композитів, зокрема легких стружкових плит (Klímek et al., 2018).

Комбінування згаданих матеріалів задля виробництва легких СП дає змогу розширити сировинну базу, а контролюючи вміст кожного з компонентів можна балансувати між кращими механічними (ефект від стружки зі стебел соняшника) та гідрофобними (ефект від стружки зі стебел міскантуса) властивостями плит. Попри зростання кількості досліджень щодо використання аграрних відходів у виробництві

СП, питання впливу стружки зі стебел соняшника та міскантуса на виділення формальдегіду з легких стружкових плит залишається недостатньо вивченим. Особливо малодослідженим є комбіноване використання цих матеріалів у внутрішньому шарі тришарових легких СП. Тому, задля підвищення інтересу виробників та науковців до таких досліджень важливо встановити вплив стружки зі стебел соняшника та міскантуса на показники емісії формальдегіду з легких СП з різним вмістом такої сировини. Зважаючи на покращення механічних властивостей використанням цих матеріалів, результати досліджень екологічності продукту можуть стати серйозним аргументом для можливості впровадження виробництва таких стружкових плит.

Мета роботи – дослідити емісію вільного формальдегіду з легких стружкових плит зі стружкою з стебел соняшника та міскантуса у внутрішньому шарі.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні *завдання дослідження*: експериментально виготовити зразки легких СП з вмістом стружки зі стебел соняшника та міскантуса, що дасть змогу визначити емісію вільного формальдегіду за стандартними методиками; почергово встановити вплив стружки стебел соняшника, стебел міскантуса та їхньої суміші на емісію вільного формальдегіду з легких стружкових плит для визначення їх екологічності.

Об'єкти і методика досліджень (Objects and methods).

Об'єкт дослідження – процес виготовлення легких СП з вмістом стружки зі стебел соняшника та міскантуса. *Предмет дослідження* – емісія формальдегіду з легких СП з вмістом стружки зі стебел соняшника та міскантуса.

Для проведення досліджень використовували три види стружки: деревинну, зі стебел соняшника та зі стебел міскантуса. Деревинна стружка була виготовлена на підприємстві з виробництва стружкових плит. Стружка складалась із суміші хвойних (75%) та листяних (25%) порід деревини. Сировина походила з Івано-Франківської області (Українські Карпати).

Стебла соняшника та міскантуса заготовляли у Львівській області. До моменту використання їх зберігали у сухих умовах. Для отримання стружки стебла спочатку подрібнювали соломорізкою, після чого додатково переробляли у дисковому млині з діаметром отворів вихідної сітки 12 мм. Отриману масу сортували просіюванням з метою вилучення дрібної

фракції. Перед виготовленням плит усі види стружки висушували у сушильній шафі за температури $95 \pm 5^\circ\text{C}$ до досягнення вологості $3 \pm 1\%$.

Для приготування клею використовували КФ смоли марки А виробництва ТОВ «Карпатсмоли» (м. Калуш, Україна). Додатково застосовували карбамід (43% розчин), сульфат амонію $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ у вигляді 33% розчину та парафінову емульсію. Основні характеристики КФ смоли були такими: густина – 1270 кг/м^3 , вміст сухого залишку – 65%, в'язкість за чашкою Форда (4 мм, 20°C) – 98 с, pH – 8,05.

У лабораторних умовах виготовляли тришарові стружкові плити розмірами $290 \times 290 \times 16$ мм (довжина $\times$ ширина $\times$ товщина) із цільовою щільністю 550 кг/м^3 . Зовнішні шари плит повністю формували з деревинної стружки. Стружку зі стебел соняшника та міскантуса у зовнішні шари не додавали через наявність у стеблах м'якої серцевини, яка могла б негативно впливати на рівномірність твердості поверхні плит та ускладнювати подальше ламінування. Тому недеревну стружку використовували тільки у внутрішньому шарі плит. Вміст стружки деревинної, зі стебел соняшника та міскантуса у внутрішньому шарі змінювали з кроком 50% відповідно до наведених в таблиці даних.

Таблиця. Розподіл стружки за видами у внутрішньому шарі зразків легких стружкових плит

Table. Distribution of particles by type in the core layer of lightweight particleboards specimens

Походження стружки	A	B	C	D	F	G
Деревина	100	0	0	50	50	0
Соняшник	0	100	0	50	0	50
Міскантус	0	0	100	0	50	50

Частка зовнішніх шарів у структурі плит становила 33%, а внутрішнього шару – 67%. Контрольні зразки виготовляли виключно з деревинної стружки. Для склеювання використовували 100% КФ смоли. Витрата абсолютно сухої смоли становила 14 мас. % для зовнішніх шарів та 9 мас. % для внутрішнього шару від маси абсолютно сухої стружки. До клейової композиції додавали карбамід у кількості 2,3 і 0,5%, а також сульфат амонію – 0,2 і 0,6% від маси сухої стружки для зовнішніх та внутрішнього шарів відповідно. Крім цього, у клейову суміш вводили

парафінову емульсію в кількості 0,8% від маси абсолютно сухої стружки.

Перед випробуванням зразки кондиціювали впродовж семи діб за температури $20 \pm 2^\circ\text{C}$ та відносної вологості повітря $65 \pm 5\%$. Для визначення емісії формальдегіду виготовлені плити розрізали на зразки визначених розмірів згідно відповідного стандарту. Випробування зразків щодо визначення емісії вільного формальдегіду проводили згідно EN ISO 12460-3 способом газової камери. Після випробувань здійснювали статистичне опрацювання експериментальних даних.

Результати (Results).

Залежності впливу стружки зі стебел соняшника та міскантуса на емісію вільного формальдегіду з легких СП наведені на рис. 1-4. За результатами досліджень усі досліджувані зразки відповідали класу емісії формальдегіду E1, нормативні значення якого згідно стандарту EN ISO 12460-3 становлять $3,5 \text{ мг/м}^2\cdot\text{год}$.

Загалом (див. рис. 1) було помічено, що збільшення частки стружки зі стебел соняшника та міскантуса у середньому шарі зменшує виділення вільного формальдегіду. Контрольні плити (А) мали найвищі показники емісії формальдегіду – $3,05 \text{ мг/м}^2\cdot\text{год}$. Найнижчі значення емісії формальдегіду – $2,32 \text{ мг/м}^2\cdot\text{год}$ зафіксовано в зразках (В) з 100% вмістом соняшникової стружки у внутрішньому шарі легких СП. Це на 23,93% менше, ніж в контрольних (А) зразках. Дещо більші значення емісії формальдегіду – $2,76 \text{ мг/м}^2\cdot\text{год}$ встановлено для зразків (С) з 100% вмістом стружки зі стебел міскантуса у внутрішньому шарі плит, що на 9,51% менше, ніж у контрольних (А). У зразках СП з комбінацією стружки деревинної, стебел соняшника і міскантуса емісія формальдегіду була нижчою, ніж в контрольних зразках (А): для зразків (D) – на 7,54, для (F) – на 5,57 і для (G) – на 14,10%.

За отриманими результатами, легкі СП зі стружки стебел соняшника і міскантуса мали найкращу екологічність. Цей аспект, на нашу думку, пов'язаний зі зв'язуванням формальдегіду стружкою соняшника і міскантуса, пористість якої є більшою ніж пористість деревини, особливо губчастої серцевинної частини стебел соняшника. Також на зменшення емісії формальдегіду з легких СП, які містять стружку з стебел соняшника, ймовірно впливає губчаста серцевинна частина стебла соняшника, яка інтенсивно поглинає леткий формальдегід.

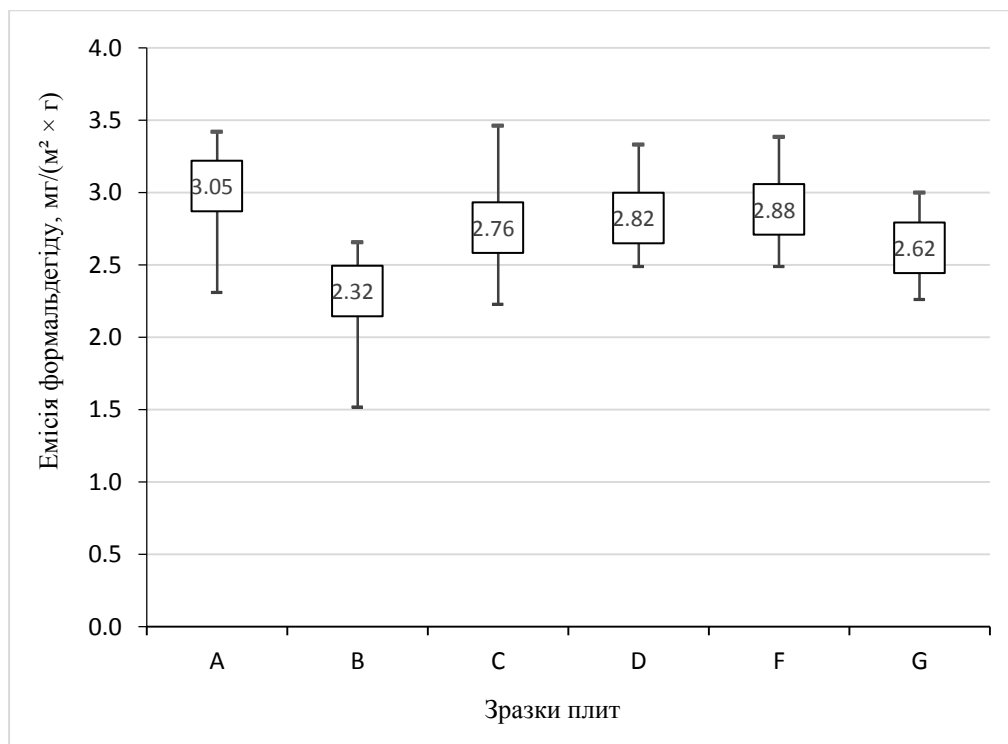


Рис. 1. Показники виділення вільного формальдегіду у дослідних зразках легких стружкових плит

Fig. 1. Free formaldehyde emission values for the experimental lightweight particleboard specimens

На рис. 2 наведено залежність і рівняння регресії емісії формальдегіду з легких СП від вмісту в них стружки зі стебел соняшника. Встановлено, що емісія формальдегіду змінюється за квадратичною залежністю.

Збільшення частки стружки зі стебел соняшника з 0 до 50% у внутрішньому шарі легких стружкових плит зменшує емісію формальдегіду з 3,05 до 2,82 мг/(м²·год) або на 7,54%, а з 0 до 100% – з 3,05 до 2,32 мг/(м²·год) або на 23,93%.

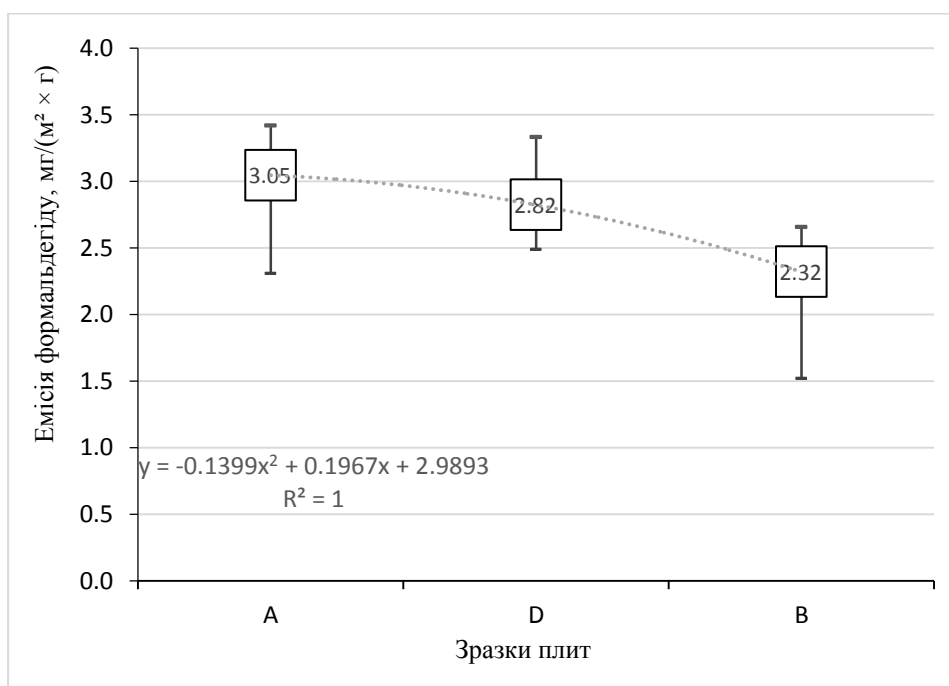


Рис. 2. Залежність емісії формальдегіду з легких СП від вмісту в них стружки зі стебел соняшника

Fig. 2. Effect of sunflower-stalk particles content on formaldehyde emission from lightweight particleboards

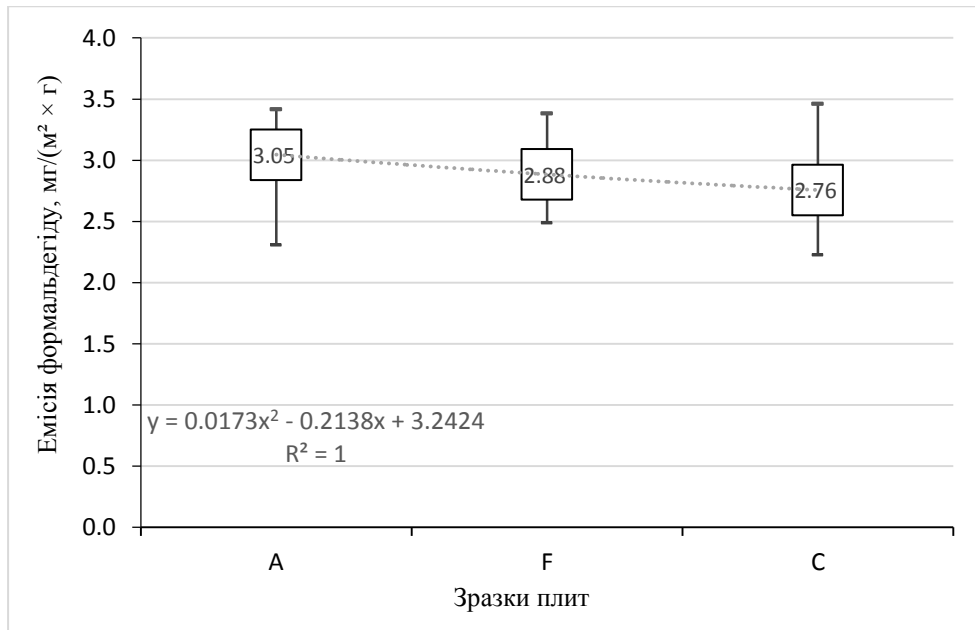


Рис. 3. Залежність емісії формальдегіду з легких СП від вмісту в них стружки зі стебел міскантуса

Fig. 3. Effect of miscanthus-stalk particles content on formaldehyde emission from lightweight particleboards

Стружка зі стебел міскантуса (див. рис. 3) впливає на емісію формальдегіду менше, ніж стружка зі стебел сояшника. Емісія формальдегіду змінюється за квадратичною залежністю. Збільшення частки стружки зі стебел міскантуса з 0 до 50% у внутрішньому шарі легких стружкових плит зменшує емісію

формальдегіду з 3,05 до 2,88 мг/(м²·год) або на 5,57%, а з 0 до 100% – з 3,05 до 2,76 мг/(м²·год) або на 9,51%.

На рис. 4 наведено графічну залежність емісії формальдегіду з легких стружкових плит від вмісту в них суміші стружки зі стебел сояшника та міскантуса.

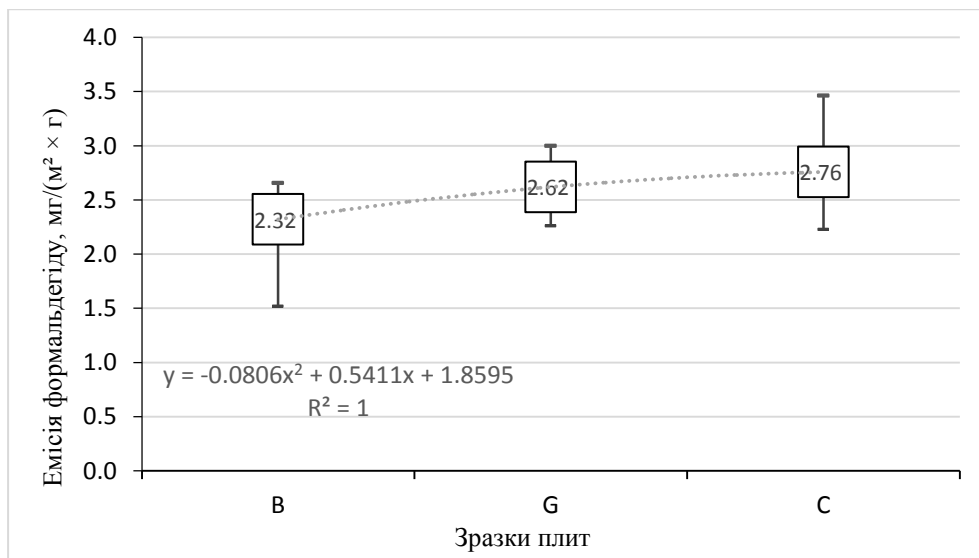


Рис. 4. Залежність емісії формальдегіду з легких СП від вмісту в них стружки зі стебел сояшника та міскантуса

Fig. 4. Effect of sunflower-stalk and miscanthus-stalk particles contents on formaldehyde emission from lightweight particleboards

Встановлено, що емісія формальдегіду також змінюється за квадратичною залежністю. Додавання до стружки зі стебел сояшника стружки зі стебел міскантуса погіршує

екологічність плит. Суміш стружки зі стебел сояшника і міскантуса у співвідношенні 50 : 50 у внутрішньому шарі легких СП спричинила зростання емісії формальдегіду з 2,32 до 2,62

мг/(м²·год) або на 12,93% порівняно з СП з 100% вмістом стружки зі стебел соняшника в їх внутрішньому шарі. Використання у внутрішньому шарі СП 100% стружки зі стебел міскантуса, замість 100% стружки зі стебел соняшника, спричинило зростання емісії формальдегіду з 2,32 до 2,76 мг/(м²·год) або на 18,97%. Отже стружка зі стебел соняшника більше зв'язує формальдегід порівняно з стружкою зі стебел міскантуса.

Дискусія (Discussion).

Bekhta et al. (2023) оцінювали ефективність виробництва легких стружкових плит з використанням стружки зі стебел соняшника. Щільність досліджуваних плит становила 550 кг/м³, а для склеювання використовували клей на основі КФ-смоли. Було встановлено, що заміна деревинної стружки в середньому шарі на стружку зі стебел соняшника призвела до покращення фізико-механічних властивостей легких стружкових плит. Значення вмісту формальдегіду становили менше 3,5 мг/100 г, і всі випробувані плити відповідали вимогам класу емісії формальдегіду E1 (≤ 8,0 мг/100 г). Представлені у цьому дослідженні результати добре узгоджуються з описаними в згаданій роботі.

У роботі Martyniak et al. (2025) досліджено використання лігноцелюлозних рослинних матеріалів у виробництві теплоізоляційних СП щільністю 250 кг/м³. Як заміник деревини використовували п'ять типів біомаси багаторічних рослин – прерійну траву (*Spartina pectinata* Link), гігантський міскантус (*Miscanthus × giganteus* J.M. Greef & Deuter ex Hodkinson & Renvoize), просо (*Panicum virgatum* L.), високу пшеницю (*Elymus elongatus* (Host) D.R. Dewey) та компасник пронизанolistий (*Silphium perfoliatum* L.). Досліджували три варіанти заміщення деревини – 30, 50 та 75%. Для склеювання використано мелаінокарбамідоформальдегідний клей. У межах аналізу виготовлених плит було досліджено механічні, хімічні та теплові властивості, викиди формальдегіду, коефіцієнт теплопередачі, теплоізоляцію і теплопровідність цих плит. Цікавим є те, що використання більшості досліджуваних рослин продемонструвало або сталі значення, або збільшення емісії формальдегіду, а плити, виготовлені з використанням міскантуса, продемонстрували зменшення її значень. Під час заміщення деревини з 30 до 75% показник емісії формальдегіду зменшувався з 0,054 до 0,045 ppm. Результати дослідження (Martyniak

et al., 2025) вказують на властивість стружки міскантуса зменшувати виділення вільного формальдегіду у стружкових плитах низької щільності, що підтверджено результатами нашого дослідження.

Результатами досліджень Kozak et al. (2025, 2025a) встановлено, що стружка зі стебел соняшника та міскантуса покращує фізико-механічні властивості плит, що досягається завдяки збільшенню адгезійних контактів у структурі плити. Разом з тим, збільшення адгезійних контактів спричиняє зростання кількості зв'язаного формальдегіду, що і зменшує його виділення. Подібного висновку дійшли і в роботі Кара (2025).

Зменшення емісії вільного формальдегіду з СП, в яких використано стружку зі стебел соняшника та міскантуса, також можна пояснити різницею їхньої щільності. Менша щільність та наявність м'якої паренхіми дає змогу формувати щільнішу структуру плити з більшою часткою адгезійного зв'язування клею. У стружки зі стебел соняшника частка паренхіми вища, порівняно зі стружкою міскантуса, тому соняшник демонструє кращі показники зв'язування вільного формальдегіду. Такий механізм узгоджується з літературними даними щодо ролі дифузії та адсорбційних процесів в емісії формальдегіду (Liu et al., 2018).

Отже, результати досліджень дали змогу вперше експериментально обґрунтувати зменшення емісії формальдегіду з легких стружкових плит за повної та часткової заміни деревинної стружки стружкою стебел соняшника і міскантуса у внутрішньому шарі таких плит. Отримані результати можуть бути використані для впровадження у виробництво екологічно безпечних легких плитних матеріалів.

Висновки (Conclusions).

1. Результатами досліджень підтверджено доцільність використання стружки зі стебел соняшника та міскантуса у виробництві легких тришарових стружкових плит для зменшення з них емісії формальдегіду.

2. Зі зростанням частки стружки зі стебел соняшника у внутрішньому шарі легких тришарових стружкових плит щільністю 550 кг/м³, склеєних КФ клеєм, емісія вільного формальдегіду зменшується. Плити, виготовлені з 100% вмістом стружки зі стебел соняшника у внутрішньому шарі, мають найнижчий показник виділення вільного формальдегіду серед усіх досліджуваних зразків. Плити, виготовлені зі 100% вмістом стружки зі стебел соняшника в середньому

шарі відповідають класу емісії формальдегіду E1 та мають на 33,71% нижчий даний показник від гранично допустимого.

3. Зі зростанням частки стружки зі стебел міскантуса у внутрішньому шарі легких тришарових стружкових плит щільністю 550 кг/м³, склеєних КФ клеєм, емісія вільного формальдегіду зменшується. Плити виготовлені з 100 % вмістом стружки зі стебел міскантуса у внутрішньому шарі мають показник виділення вільного формальдегіду вищий порівняно з плитами з стружки зі стебел соняшника, але нижчий ніж показник контрольних плит з виключно деревинної стружки. Плити, виготовлені зі 100% вмістом стружки зі стебел міскантуса в середньому шарі відповідають класу емісії формальдегіду E1 і мають на 21,14% нижчий даний показник від гранично допустимого.

4. Комбінування стружки зі стебел соняшника, міскантуса та деревинної стружки у плитах щільністю 550 кг/м³, склеєних КФ клеєм, демонструє зменшення емісії вільного формальдегіду порівняно з контрольними плитами. Найнижчого показника досягнуто під час комбінування тільки стружки зі стебел соняшника та міскантуса. Плити, виготовлені комбінуванням стружки зі стебел соняшника та міскантуса в середньому шарі, відповідають класу емісії формальдегіду E1 та мають на 25,14% нижчий даний показник від гранично допустимого.

Конфлікт інтересів (Conflicts of Interest).

Автори заявляють про відсутність у них відомих конкуруючих фінансових інтересів чи особистих зв'язків, які могли б вплинути на результати, представлені у цій статті.

Список літератури (References)

- Bekhta, P., Kozak, R., Gryc, V., Pipiška, T., Sedliačik, J., & Reh, R. (2023). Properties of lightweight particleboard made with sunflower stalk particles in the core layer. *Industrial Crops and Products*, 205, 117444. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117444>
- Bekhta, P., & Sedliačik, J. (2019). Environmentally-Friendly High-Density Polyethylene-Bonded Plywood Panels. *Polymers*, 11(7), 1166. <https://doi.org/10.3390/polym11071166>
- Chrobak, J., Howska, J., & Chrobok, A. (2022). Formaldehyde-Free Resins for the Wood-Based Panel Industry: Alternatives to Formaldehyde and Novel Hardeners. *Molecules*, 27(15), 4862. <https://doi.org/10.3390/molecules27154862>

ECHA. Formaldehyde. European Chemicals Agency (ECHA) Substance Information Database, InfoCard № 100.000.002. URL: <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.000.002>

Ferdosian, F., Pan, Z., Gao, G., & Zhao, B. (2017). Bio-Based Adhesives and Evaluation for Wood Composites Application. *Polymers*, 9(2), 70. <https://doi.org/10.3390/polym9020070>

Frihart, C. R., Chaffee, T. L., & Wescott, J. M. (2020). Long-Term Formaldehyde Emission Potential from UF- and NAF-Bonded Particleboards. *Polymers*, 12(8), 1852. <https://doi.org/10.3390/polym12081852>

Hemmilä, V., Adamopoulos, S., Karlsson, O., & Kumar, A. (2017). Development of sustainable bio-adhesives for engineered wood panels: A review. *RSC Advances*, 7(61), 38604–38630. <https://doi.org/10.1039/C7RA06598A>

IARC. Formaldehyde, 2-Butoxyethanol and 1-tert-Butoxypropan-2-ol. Lyon: International Agency for Research on Cancer, 2006. (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans; Vol. 88). URL: <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Formaldehyde-2006>

Ikubanni, P. P., Adeleke, A. A., Adekanye, T. A., Aladegboye, O. J., Agboola, O. O., & Ogunsemi, B. T. (2025). Particleboard from biomass wastes: A review of production techniques, properties, and future trends. *Research on Engineering Structures & Materials*, 11(2), 713–740. <https://doi.org/10.17515/resm2024.265ma0502rv>

Kara, M. E. (2025). Mechanical and physical properties of particleboard produced from hemp plant. *BioResources*, 20(3), 5361–5376. <https://doi.org/10.15376/biores.20.3.5361-5376>

Keskin, H., Küçüktüvek, M., & Gür, M. (2015). The potential of poppy (*Papaver somniferum* Linnaeus) husk for manufacturing wood-based particleboards. *Construction and Building Materials*, 95, 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.160>

Kozak, R. O., & Biruk, V. S. (2025). Mechanical properties of lightweight particleboards containing sunflower and miscanthus stem particles. *Scientific Bulletin of Ukrainian National Forestry University*, 35(6), 41–48. <https://doi.org/10.36930/40350605> [Козак, Р. О., Бірук, В. С. (2025). Механічні властивості легких стружкових плит із вмістом стружки стебел соняшника та міскантуса. *Науковий*

- вісник НЛТУ України, 35(6), 41–48] (in Ukrainian)
- Kozak, R., & Biruk, V. (2025a). Operational properties of lightweight particleboard with sunflower and miscanthus stem particles. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 29, 290–301. <https://doi.org/10.36930/412539> [Козак, Р., Бірук, В. (2026). Експлуатаційні властивості легких стружкових плит з вмістом стружки стебел соняшника та міскантуса. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, 29, 290–301] (in Ukrainian)
- Klímeček, P., Wimmer, R., Meinlschmidt, P., & Kúdela, J. (2018) Utilizing Miscanthus stalks as raw material for particleboards. *Industrial Crops and Products*, 111, 270–276. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.032>
- Kristak, L., Antov, P., Bekhta, P., Lubis, M. A. R., Pizzi, A., & Hejna, A. (2022). Recent progress in ultra-low formaldehyde emitting adhesive systems and formaldehyde scavengers in wood-based panels: A review. *Wood Material Science & Engineering*, 18(2), 763–782. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2056080>
- Lee, S. H., Lum, W. C., Geng, B. J., Krišťák, L., Antov, P., Pędzik, M., ... Pizzi, A. (2022). Particleboard from agricultural biomass and recycled wood waste: a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 20(4-5), 4630–4658. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.166>
- Liu, R., Liu, M., Qu, Y., Huang, A., & Ma, E. (2018). Dynamic moisture sorption and formaldehyde emission behavior of three kinds of wood-based panels. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76, 1037–1044. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1255-y>
- Martyniak, D., Pędzik, M., Żurek, G., Tomczak, K., Gąsiorowski, R., Komorowicz, M., & Janiszewska-Latterini, D. (2025). Exploitation of Perennial Plant Biomass for Particleboards Designed for Insulation Applications. *Materials*, 18(2), 352. <https://doi.org/10.3390/ma18020352>
- Pizzi, A., Papadopoulos, A. N., & Policardi, F. (2020). Wood Composites and Their Polymer Binders. *Polymers*, 12(5), 1115. <https://doi.org/10.3390/polym12051115>

Formaldehyde emissions from lightweight particleboard containing sunflower and miscanthus stalk particles

R. Kozak¹, V. Biruk²

The study presents the results of investigating the effect of sunflower-stalk (*Helianthus annuus* L.) and miscanthus-stalk (*Miscanthus × giganteus*) particles (chips) on free formaldehyde emissions from lightweight three-layer particleboards glued with urea-formaldehyde (UF) adhesive. The relevance of this study is due to increasingly stringent environmental requirements for wood-based composite materials and the need to reduce the consumption of wood raw materials in the production of boards (panels). Formaldehyde is classified as a carcinogenic and substance, and current trends in the woodworking industry are focused on reducing its emissions while simultaneously reducing dependence on traditional

wood raw materials. In this context, agricultural lignocellulosic residues are considered promising alternative resources for sustainable particleboard production. Among such materials, sunflower stalks and miscanthus biomass attract considerable attention due to their low density, porous structure, wide availability and potential for improving the environmental performance of composite panel materials. Therefore, the aim of the study was to determine the impact of partial and complete replacement of wood particles in the core layer of lightweight particleboards with sunflower stalk and miscanthus stalk particles on the level of formaldehyde emission. Three-layer particleboards with a density of 550 kg/m³ were

¹ Ruslan Kozak – Corresponding Member of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Wood-Based Composites, Cellulose & Paper. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: kozak_r@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1297-9810>

² Volodymyr Biruk – PhD Student at the Department of Wood-Based Composites, Cellulose & Paper. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: volodymyr.biruk@nltu.edu.ua ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-7425-0769>

manufactured in laboratory conditions. The outer layers consisted entirely of wood particles (chips), while the core layer contained different proportions of wood particles, sunflower stalks and miscanthus stalks. Agricultural raw material particles were included in the core layer with a substitution step of 50%, including mixtures of sunflower and miscanthus particles. An urea-formaldehyde resin-based adhesive was used for bonding. The emission of free formaldehyde was determined by gas analysis according to EN ISO 12460-3. The highest emission value was recorded for the control boards and was 3.05 mg/(m²·h). The lowest formaldehyde emission level was obtained for boards containing 100% sunflower stalk particles in the core layer amounting to 2.32 mg/(m²·h), which is 23.93% lower compared to the control samples. Boards made from 100% miscanthus stalk particles showed an average formaldehyde emission value of 2.76 mg/(m²·h), which is 9.51% lower than this indicator of the control boards. The combined use of sunflower and miscanthus particles also contributed to the reduction of formaldehyde emissions compared to the control lightweight particleboards. All tested specimens

met the requirements for formaldehyde emission class E1 in accordance with EN ISO 12460-3. The reduction in formaldehyde emission can be attributed to the structural characteristics of lignocellulosic agricultural raw materials, their lower density and the formation of a denser internal structure of the board with improved adhesive bonding and reduced porosity. In particular, sunflower stalk particles demonstrated the best ability to bind and retain formaldehyde due to the presence of a porous parenchymal structure of the stem pith. The findings demonstrate the potential of sunflower stalk and miscanthus particles as environmentally friendly alternative raw materials for the production of lightweight particleboards. Their use enables the expansion of the raw material base for panel production, reduces wood consumption, enhances environmental sustainability, and facilitates the development of sustainable technologies aimed at reducing the use of wood in the manufacture of wood-based composite materials.

Key words: eco-friendly particleboards; lightweight composites; formaldehyde containing resins; agricultural raw materials; lignocellulosic materials; wood saving technologies.