



Аспірант Л.Е. Лесів¹ – НЛТУ України

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВПЛИВУ СКЛАДОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ВЖИВАНОЇ ДЕРЕВИНИ НА ФІЗИКО- МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМБІНОВАНИХ СТОЛЯРНИХ ПЛИТ

Використання вживаної деревини (ВЖД) у виробництві столярних плит (СП) є актуальним напрямом, що спрямований на раціональне використання вторинних ресурсів та зменшення дефіциту первинної деревини. У статті здійснено теоретичне обґрунтування закономірностей впливу складових елементів СП із ВЖД на їхні фізико-механічні характеристики. Основну увагу приділено аналізу напружено-деформаційного стану плит, формостійкості та довговічності конструкцій з урахуванням анізотропії матеріалу. Запропоновано підхід прогнозування характеристик СП на основі методу кінцевих елементів (МКЕ), що дозволяє моделювати поведінку конструкцій в умовах змінної вологості та температури. Встановлено, що для опису анізотропії деревини можуть бути використані ортогональна, циліндрична та трансверсальна схеми, вибір яких залежить від орієнтації волокон і розмірів рейок. Обґрунтовано доцільність застосування циліндричної системи координат для аналізу формостійкості плит у процесах усушки та розбухання, особливо тоді, коли кривизна річних шарів істотно впливає на якість виробу. Розроблено прикладну методику розрахунку фізико-механічних характеристик рейок із ВЖД з урахуванням анізотропії та змін вологісно-температурних умов довкілля. Запропоновані математичні моделі дають змогу прогнозувати міцність і формостійкість СП залежно від конструктивних параметрів та умов експлуатації, а також оптимізувати конструкції ще на стадії проектування. Встановлено оптимальне співвідношення сторін поперечного перерізу рейок (1:3) та рекомендований кут нахилу річних шарів (не менше 60°), що сприяє зниженню жолобленості. Вперше отримано математичну залежність, яка описує вплив ширини рейок із ВЖД на формостійкість плит, що дозволяє раціонально обирати параметри конструкцій. Результати дослідження підтверджують, що застосування МКЕ та нових математичних моделей підвищує точність прогнозування властивостей СП із ВЖД, сприяє розробленню нових конструктивних рішень і забезпечує їхню міцність, надійність та довговічність.

Ключові слова: вживана деревина, столярні плити, фізико-механічні характеристики, метод кінцевих елементів, анізотропія, моделювання, формостійкість, жолобленість, оптимізація конструкцій.

Вступ. В умовах сучасного розвитку деревообробної промисловості особливої актуальності набуває питання ефективного використання вторинних ресурсів [14, 17, 32, 33, 39, 40, 43, 50, 51, 52, 53, 56, 61, 69, 72, 75, 76, 77, 84, 104, 108, 112]. Використання вживаної деревини (ВЖД) [6, 7, 10, 12, 15, 17, 31, 34, 38, 49, 54, 62, 69, 77, 83] як альтернативи первинній сировині дає змогу одночасно вирішити дві важливі проблеми: дефіцит якісної деревини та утилізацію деревинних відходів. З огляду на обмеженість запасів первинної деревини в Україні, заміна її на ВЖД з відповідними фізико-механічними характеристиками є перспективним напрямком у виробництві конструкційних матеріалів – столярних плит (СП) [22, 23, 26, 27, 36, 55, 78, 88, 91, 92, 109].

Якість СП із ВЖД залежить від низки чинників, серед яких вирішальне значення мають фізико-механічні властивості заготовок та їх напружено-деформаційний стан. Міцність, надійність, формостійкість і довговічність таких

¹ Лесів Лев Едуардович – аспірант кафедри технологій меблів і виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103. м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-258-31-75, +38-097-127-42-26. E-mail: lev.lesiv@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3959-5447>

плит визначаються розмірами рейок, характером їх укладання (тангентальні чи радіальні рейки за поперечним перерізом), поєднанням порід деревини або різних матеріалів в одній конструкції, а також типом личків. Застосування оптимальних конструктивних рішень у поєднанні з адекватними методами прогнозування створених конструкційних матеріалів [1, 3, 18, 19, 20, 28, 30, 32, 44, 47, 48, 52, 95, 96, 98, 101, 105] забезпечує високі експлуатаційні показники готової продукції. Сучасні дослідження фізико-механічних властивостей СП [1, 5, 22, 26, 27, 35, 37, 38, 39, 44, 46, 57, 63, 88, 97, 103] активно використовують методи математичного моделювання [32, 42, 59, 60, 65, 66, 67, 74, 93, 95, 106] що дає можливість підвищити точність прогнозування їхньої поведінки під дією зовнішніх чинників. Особливу роль у цьому відіграє метод кінцевих елементів (МКЕ), який дозволяє детально відтворювати напружено-деформаційний стан конструкцій та оптимізувати їхні параметри. Застосування МКЕ для аналізу процесів усушки та розбухання плит з урахуванням анізотропії деревини є одним із пріоритетних напрямів досліджень у НЛТУ України.

Таким чином, теоретичне обґрунтування закономірностей впливу складових елементів із вживаної деревини на фізико-механічні характеристики комбінованих столярних плит [31, 32, 58, 87, 88, 89] є актуальним завданням, яке має важливе значення для розвитку деревообробної галузі та впровадження екологічно орієнтованих технологій.

Актуальність дослідження. В умовах обмежених запасів первинної деревини в Україні особливого значення набуває залучення до виробничих процесів вторинних ресурсів, зокрема вживаної деревини (ВЖД). Використання ВЖД [8, 9, 10, 13, 16, 24, 27, 70] дозволяє одночасно вирішити дві ключові проблеми: знизити дефіцит якісної первинної сировини та мінімізувати обсяги деревинних відходів, що утворюються після завершення життєвого циклу виробів. Одним із перспективних напрямів застосування ВЖД є виробництво СП, які широко використовуються у меблевій та будівельній галузях. Розроблення нових конструкцій СП із ВЖД з урахуванням їхніх фізико-механічних властивостей та напружено-деформаційного стану є важливим завданням, що має значний науковий та практичний інтерес при застосуванні гнучких виробничих систем [4, 41, 73, 81, 85, 86, 90, 100, 107, 110, 111].

Проблемність дослідження. Незважаючи на зростання інтересу до використання ВЖД, існує низка науково-технічних проблем, що обмежують широке впровадження таких матеріалів у виробництво СП з відповідними технологіями підготовки ВЖД [9, 11, 12, 19, 20, 21, 24, 25, 29, 30, 36, 94, 96, 99, 102]. По-перше, фізико-механічні характеристики ВЖД є неоднорідними та залежать від умов попередньої експлуатації, що ускладнює прогнозування властивостей готових виробів. По-друге, міцність, надійність і довговічність СП істотно визначаються конструктивними факторами: розмірами рейок, схемою їх укладання (тангентальні чи радіальні рейки за поперечним перерізом), поєднанням різних порід деревини та типом личків. По-третє, існуючі методи оцінки міцності не завжди дозволяють комплексно враховувати вплив анізотропії деревини та особливостей її напружено-деформаційного стану [32, 42, 68]. У зв'язку з цим актуальною є розробка теоретичного обґрунтування закономірностей впливу складових елементів із ВЖД на

характеристики СП із використанням сучасних інструментів математичного моделювання, зокрема методу кінцевих елементів.

Мета дослідження – теоретично обґрунтувати закономірності впливу складових елементів із вживаної деревини на фізико-механічні характеристики комбінованих столярних плит та визначити шляхи підвищення їх міцності, формостійкості й довговічності шляхом оптимізації конструктивних рішень і застосування сучасних методів моделювання.

Об’єкт дослідження – процеси формування фізико-механічних характеристик комбінованих столярних плит із вживаної деревини.

Предмет дослідження – закономірності впливу конструктивних параметрів складових елементів (розмірів рейок, схеми їх укладання, поєднання різних порід і матеріалів, типу личківки) та їх напружено-деформаційного стану на міцність, формостійкість і довговічність столярних плит із вживаної деревини.

Завдання дослідження: Проаналізувати сучасний стан та перспективи використання ВЖД у виробництві СП з врахуванням принципів циркулярної економіки [33, 34, 35, 47, 64, 69, 79, 80, 82, 83, 90]. Визначити основні фізико-механічні властивості заготовок із ВЖД та їх вплив на якість комбінованих СП. Дослідити вплив конструктивних факторів (розмірів рейок, їх орієнтації, поєднання порід та матеріалів, виду личківки) на експлуатаційні характеристики плит. Обґрунтувати теоретичні підходи до оцінки напружено-деформаційного стану СП із ВЖД. Застосувати метод кінцевих елементів для моделювання процесів усушки, розбухання та деформацій плит з урахуванням анізотропії деревини. Розробити рекомендації щодо оптимізації конструкцій СП із ВЖД з метою підвищення їх міцності, надійності та довговічності.

Обґрунтування конструкцій комбінованих столярних плит із вживаної деревини. Для вивчення закономірностей впливу складових елементів із вживаної деревини (ВЖД) на фізико-механічні характеристики столярних плит (СП) було розроблено та виготовлено низку експериментальних зразків з різними конструктивними рішеннями. При створенні конструкцій враховувались технологічні особливості оброблення ВЖД, а також необхідність моделювання умов, які дозволяють оцінити як окремих, так і комбінований вплив різних елементів на міцність та формостійкість готових виробів.

Конструктивна варіативність передбачала два основних підходи:

1. **Звичайні СП із ВЖД** – складені з рейок однієї породи деревини з різним комбінованим укладанням за кутами нахилу річних кілець у поперечному перерізі. Такий підхід давав можливість дослідити вплив орієнтації волокон на механічну поведінку та стабільність плит (рис. 1).
2. **Комбіновані СП із ВЖД** – сформовані почерговим укладанням рейок із деревини та елементів деревостружкової плити (ДСП). Це рішення дозволяло оцінити ефект поєднання матеріалів із різними фізико-механічними характеристиками та структурою (рис. 2).

Додатково було передбачено два варіанти з’єднання рейок: Тип СР – рейки попередньо склеювались між собою, що забезпечувало підвищену жорсткість та зменшення ймовірності деформацій; Тип НР – рейки не склеювались, що дозволяло оцінити поведінку плит за менш жорсткого внутрішнього з’єднання та вплив розподілу навантажень через личкування. Личкування усіх зразків виконували

фанерою товщиною 3 мм, що відповідало поширеним промисловим технологіям і забезпечувало порівнянність результатів. Товщина виготовлених плит складала 22 мм згідно з вимогами ДСТУ 13715. Параметри рейок було варійовано для вивчення впливу ширини на міцність і стабільність конструкцій: 16, 32, 48 та 64 мм при товщині 16 мм (після двостороннього фрезерування на рейсмусному верстаті). Габарити експериментальних зразків становили 450×450×22 мм, що забезпечувало зручність випробувань та можливість отримання репрезентативних даних. Запропонований підхід до формування конструкцій СП із ВЖД дозволив комплексно оцінити вплив орієнтації волокон, поєднання різних матеріалів, типу з'єднання та геометричних параметрів складових на фізико-механічні характеристики готових плит. Це забезпечує наукове підґрунтя для оптимізації конструкційних рішень та технологічних режимів у виробництві СП з вторинних деревних ресурсів.

Звичайні столярні плити із ВЖД

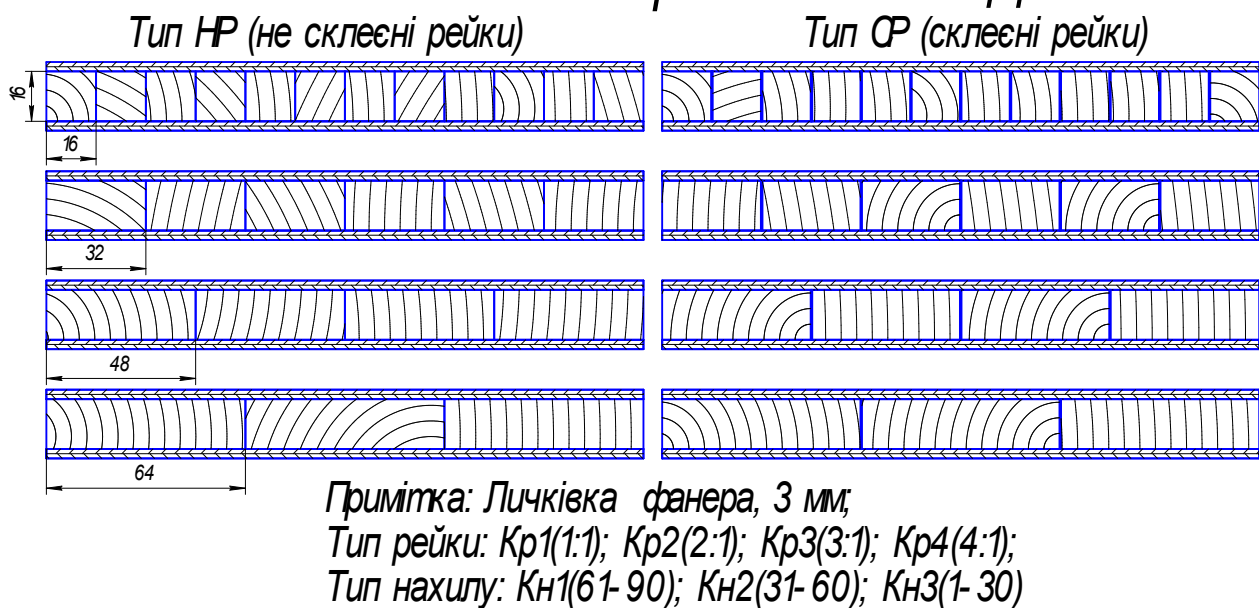


Рис. 1. Конструкції столярних плит із ВЖД комбінованого укладання

Комбіновані столярні плити із ВЖД

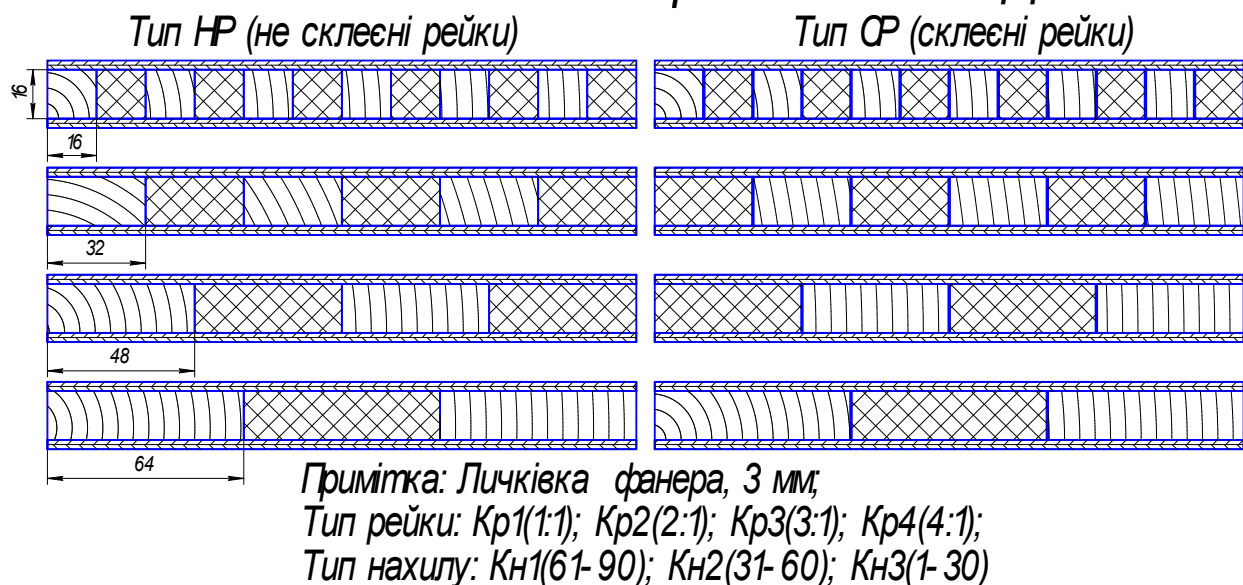


Рис. 2. Конструкції комбінованих столярних плит із ВЖД

Методика моделювання. Методика прогнозування властивостей СП, яка складається з клесних рейок (стержнів) із ВЖД, базується на моделюванні напружено-деформованого стану виробу, який виникає при набуханні деревини при збільшенні вологості. Комп'ютерні системи кінцево-елементного аналізу дозволяють врахувати анізотропію фізико-механічних властивостей деревини ВЖД, а також її характеристики під час зміни вологості. Великий внесок у вивчення анізотропії пружних та міцнісних властивостей деревини вніс Е.К. Ашкеназі [1]. Для виробів з деревини, в залежності від форми, розмірів та орієнтації в перерізі, можна використовувати такі види розрахункових схем анізотропії: ортогональну, циліндричну або трансверсальну. Оскільки деревина розглядається як тіло з цілком вираженою циліндричною анізотропією фізико-механічних властивостей, то структурні особливості деревини визначають явно виражені відмінності пружних властивостей за різними напрямками. Використання схеми циліндричної анізотропії під час вирішення задач механіки твердого деформованого тіла для розрахунку СП із ВЖД актуально з практичної точки зору, коли не можливо знехтувати кривизною річних шарів, тобто при аналізі формостійкості СП та рейок з ВЖД при розбуханні і усушці. Використовуючи закон Гука, пружну анізотропію деревини можна описати за допомогою теорії пружності анізотропного тіла. Деревина має лінійну залежність між деформаціями ϵ та напруженнями σ , зокрема при короткотермінових навантаженнях. В СП, яка містить рейки з ВЖД з вираженою анізотропією, матриця податливості $[B]$, яка зв'язує шість компонент напруження з компонентами деформації, містить не більше 21 незалежну змінну. В загальному випадку рейки з ВЖД, які знаходяться в середині СП, можуть мати початкові деформації, які зумовлені температурою або вологістю. Якщо позначити ці деформації через $\{\epsilon_0\}$, то напруження будуть визначатися різницею між діючими та початковими деформаціями.

Крім того, рейки із ВЖД у СП можуть мати початкові напруження $\{\sigma_0\}$. Таким чином, в припущенні пружної поведінки рейок із ВЖД в СП співвідношення між напруженнями і деформаціями будуть лінійними:

$$\{\sigma\} = [B](\{\epsilon\} - \{\epsilon_0\}) + \{\sigma_0\} \text{ або } \{\epsilon\} = [B](\{\sigma\} - \{\sigma_0\}) + \{\epsilon_0\}. \quad (1)$$

де: $[B]$ – матриця податливості (пружності), яка містить характеристики рейок ВЖД; $\{\epsilon\}$ – деформації рейок; σ – напруження рейок; σ_0, ϵ_0 – початкові напруження або деформації рейок із ВЖД, які пов'язані із вологістю.

Загальний вигляд матриці $[B]$ з використанням звичайних пружних постійних: модуля пружності E та коефіцієнта Пуансона ν має вигляд:

$$[B] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \times \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Матриця податливості для деревини, яка має три площини пружної симетрії, розміром 6 х 6, має вигляд:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_r} & -\frac{\mu_{tr}}{E_r} & -\frac{\mu_{ar}}{E_r} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{rt}}{E_t} & \frac{1}{E_t} & -\frac{\mu_{at}}{E_t} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{ra}}{E_a} & -\frac{\mu_{ta}}{E_a} & \frac{1}{E_a} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{rt}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{ta}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{ra}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

де: E – модуль пружності деревини ВЖД; μ – коефіцієнт поперечної деформації (ДСТУ 16483.29); G – модуль зсуву (ДСТУ 16483.30).

Для позначення поперечної деформації μ і при різних напрямках стиску відносно річних шарів і волокон при μ ставлять два індекси, з яких перший означає напрямок поперечної деформації, а другий – напрямок стиску, який викликав поперечну деформацію. Напрямок вздовж волокон позначають індексом a поперек волокон в радіальному напрямку – індексом r і в тангентальному напрямку – індексом t . Для коефіцієнтів поперечної деформації встановлюють наступні позначення: μ_{ra} ; μ_{ta} – коефіцієнти поперечної деформації в радіальному і тангенціальному напрямках при стисканні вздовж волокон; μ_{ar} ; μ_{tr} – коефіцієнти поперечної деформації вздовж волокон і в тангентальному напрямку при стисненні в радіальному напрямку; μ_{at} ; μ_{rt} – коефіцієнти поперечної деформації вздовж волокон і в радіальному напрямку при стисненні в тангентальному напрямку. Для модулів зсуву G встановлюють такі позначення: G_{ra} - модуль зсуву в площині радіального розрізу при стисненні під кутом 45° до цієї площини і напрямку волокон; G_{ta} - модуль зсуву в площині тангентального розрізу при стисненні під кутом 45° до цієї площини і напрямку волокон; G_{rt} - модуль зсуву в радіальній або тангентальній площині при стисненні під кутом 45° до цих площин. Для ортотропних рейок для СП (з малим поперечним перерізом або об'ємом деревини) з 12 пружних постійних, які входять у матрицю податливості $[B]$, тільки 9 є незалежними, оскільки завжди виконуються наступні умови:

$$\frac{\mu_{ra}}{E_a} = \frac{\mu_{ar}}{E_r}; \quad \frac{\mu_{ta}}{E_a} = \frac{\mu_{at}}{E_t}; \quad \frac{\mu_{rt}}{E_t} = \frac{\mu_{tr}}{E_r}. \quad (4)$$

Для трансверсально-ізотропних рейок для СП (з великим поперечним перерізом або об'ємом деревини) з 12 пружних постійних, які входять у матрицю податливості $[B]$, тільки 5 є незалежними, оскільки завжди виконуються ще чотири наступні умови:

$$-\frac{\mu_{ra}}{E_a} = -\frac{\mu_{ar}}{E_r} = -\frac{\mu_{ta}}{E_a} = -\frac{\mu_{at}}{E_t}; \quad \frac{1}{E_t} = \frac{1}{E_r}; \quad \frac{1}{G_{ta}} = \frac{1}{G_{ar}}; \quad G_{rt} = \frac{E_r}{2(1 + \mu_{rt})}. \quad (5)$$

Наведені схеми ортогональної та трансверсальної анізотропії механічних властивостей рейок із ВЖД можуть бути реалізовані в CAD/CAE-системах. Під час розрахунку властивостей СП необхідно вибрати тримірний ортотропний елемент (рейку) та вказати механічні властивості її в трьох напрямках. Початкові деформації ε_0 або напруження σ_0 рейок із ВЖД, які пов'язані із вологістю, в матричній формі можна записати у такому вигляді:

$$\{\varepsilon_0\} = (W - W_0) [k_r; k_t; k_a; 0; 0; 0] \text{ або } \{\sigma_0\} = (W - W_0) [k_r; k_t; k_a; 0; 0; 0]$$

де: W , W_0 – кінцева та початкова вологість рейок із ВЖД; k_r ; k_t ; k_a – коефіцієнти всихання в радіальному, тангентальному і поздовжньому напрямку відповідно.

Математичні моделі прогнозування властивостей. Обґрунтування прогнозування властивостей СП із ВЖД ґрунтується на таких міркуваннях: Фізико-механічні властивості СП із ВЖД залежать від характеристик ВЖД, зокрема, вологості та міцності при статичному згині рейок. Фізико-механічні властивості СП із ВЖД залежать від виду рейок, зокрема, рейок з масиву (монолітних та зрощених) та рейок з ДСП. Існує тісний кореляційний зв'язок між шириною рейок і породою та міцністю на статичний згин в поперек рейок СП. Міцність на статичний згин в поперек рейок залежить від схеми укладання рейок у столярному щиті. Міцність на сколювання по клейовому шару залежить від виду личкувального матеріалу. Міцність на статичний згин в поперек рейок залежить від виду личкувального матеріалу та витрат клею на з'єднання рейок між собою. Існує тісний кореляційний зв'язок між шириною рейок і видом рейок та формостійкістю. Формостійкість залежить від кута нахилу волокон у рейках. Склеювання рейок в СП – підвищує міцність, але знижує формостійкість; Личкувальний шар з кожного боку столярного щита повинен становити більше 3 мм. Чим більша ширина рейок із ДСП у порівнянні із шириною рейок із масиву, тим краща формостійкість, але менша міцність.

Для прогнозування властивостей СП із ВЖД необхідно враховувати всі компоненти, які впливають на показники якості одержаних плит (табл. 1).

Таблиця 1. Показники СП із ВЖД

Параметр	Позначення	Одиниці вимірювання
Ширина рейок	a	мм
Товщина рейок	h	мм
Коефіцієнт ширини до товщини K_p	a/h	–
Кут нахилу волокон у рейках	α	град
Коефіцієнт нахилу волокон K_a	$90/\alpha$	–
Міцність при статичному згині, ВЖД (масив)	$\sigma_{ВЖД(масив)}$	МПа
Міцність при статичному згині, ВЖД (ДСП)	$\sigma_{ВЖД(ДСП)}$	МПа
Межа міцності при статичному згині, порода	$\sigma_{порода}$	МПа
Межа міцності при статичному згині, ДСП	$\sigma_{ДСП}$	МПа
Коефіцієнт на породу ВЖД	k_p	–
Коефіцієнт на вид ДСП	$k_{ДСП}$	–
Вологість ВЖД (масив)	$W_{ВЖД}$	%
Вологість ВЖД (ДСП)	$W_{ДСП}$	%
Вік ВЖД	N	років
Вид личківки, фанера (ДВП)	$M_{л}$	–
Конструкція СП із ВЖД	СПзв; СПк	–

Функції залежностей властивостей СП із ВЖД від вхідних компонентів

а) міцність при статичному згині в поперек рейок:

для звичайних СП із ВЖД комбінованого укладання

$$\sigma_{зв} = f(\sigma_{ВЖД(масив)}; K_p; K_\alpha; k_p; W_{ВЖД}; N; M_L)$$

для комбінованих СП із ВЖД

$$\sigma_{ком} = f(\sigma_{ВЖД(масив)}; \sigma_{ВЖД(ДСП)}; K_p; K_\alpha; k_p; k_{ДСП}; W_{ВЖД}; W_{ДСП}; N; M_L)$$

б) формостійкість: звичайних СП із ВЖД

$$S_{зв} = f(\sigma_{ВЖД(масив)}; K_p; K_\alpha; k_p; W_{ВЖД}; M_L)$$

комбінованих СП із ВЖД

$$S_{ком} = f(\sigma_{ВЖД(масив)}; \sigma_{ВЖД(ДСП)}; K_p; K_\alpha; k_p; k_{ДСП}; W_{ВЖД}; W_{ДСП}; M_L)$$

Враховуючи результати теоретичних досліджень та результати тривалих експериментальних досліджень і характер їх зміни, для прогнозування характеристик СП із ВЖД запропоновано математичні логарифмічні залежності (апроксимовані функції результатів досліджень).

Математичні залежності мають вигляд:

а) для прогнозування міцності СП із ВЖД ($\sigma_{СП}$)

$$\sigma_{СП} = A \cdot K_\alpha + B \cdot \log_{K_p}(C \cdot \sigma_{ВЖД}^{(i)}),$$

де: А, В, С – коефіцієнти апроксимації, які залежать від конструкції плити, властивостей рейок із ВЖД, виду личків та вологості; K_α – коефіцієнт, який враховує кут нахилу волокон : $K_\alpha = 90/\alpha$; K_p – співвідношення розмірів ширини до товщини рейки : $K_p = a/h$; $\sigma_{ВЖД}^{(i)}$ – міцність і-тої рейки із ВЖД.

а) для прогнозування формостійкості СП із ВЖД ($S_{СП}$)

$$S_{СП} = A \cdot K_\alpha + B \cdot \log_{K_p}(C \cdot S_{ВЖД}^{(i)}),$$

де: А, В, С – коефіцієнти апроксимації, які залежать від конструкції плити, властивостей рейок із ВЖД, напружено-деформівного стану рейок із ВЖД, виду личків та вологості; K_α – коефіцієнт, який враховує кут нахилу волокон : $K_\alpha = 90/\alpha$; K_p – коефіцієнт співвідношення розмірів ширини до товщини рейки : $K_p = a/h$; $S_{ВЖД}^{(i)}$ – формостійкість і-тої рейки із ВЖД.

Висновки

1. Запропоновано теоретичний підхід до прогнозування фізико-механічних характеристик столярних плит із вжд на основі методу кінцевих елементів (МКЕ), що дозволяє враховувати анізотропію матеріалу та зміну його властивостей під дією вологісно-температурних чинників. Встановлено, що для опису анізотропії СП із ВЖД можуть використовуватися різні розрахункові схеми – ортогональна, циліндрична або трансверсальна, вибір яких залежить від орієнтації волокон у рейках та розмірів елементів конструкції. Обґрунтовано застосування моделі фізико-механічних властивостей рейок із ВЖД у циліндричній системі координат, що забезпечує адекватність результатів при аналізі формостійкості плит у процесах усушки та розбухання.

2. Доведено доцільність використання циліндричної анізотропії при розрахунку СП із ВЖД у тих випадках, коли неможливо знехтувати кривизною річних шарів, зокрема під час аналізу жолоблення та втрати формостійкості. Розроблено прикладну методику розрахунку СП із ВЖД, яка враховує особливості анізотропії та зміни фізико-механічних характеристик рейок за умов дії вологісно-температурних навантажень. Обґрунтування нових конструкцій СП із ВЖД на базі МКЕ дозволяє виявляти потенційні дефекти на концептуальній стадії проектування та оптимізувати конструкцію ще до початку виготовлення.

3. Запропоновано оптимальну схему компонування річних шарів у суміжних рейках СП із ВЖД, яка забезпечує зниження жолобленості та рівномірний розподіл напружень у виробі при зміні вологості під час експлуатації. Розроблено математичні моделі, що дозволяють прогнозувати міцність і формостійкість СП із ВЖД залежно від конструктивних параметрів та умов експлуатації. Запропонована модель може бути використана для оптимізації нових конструкцій СП за критеріями міцності та деформативності, що розширює можливості проектування комбінованих плит із вторинних ресурсів. Для забезпечення стабільної формостійкості СП із ВЖД рекомендовано застосовувати рейки з поперечним перерізом у співвідношенні сторін 1:3 та кутом нахилу річних шарів у торці не менше 60°, що знижує ризик жолоблення при зміні вологості. Вперше встановлено математичну залежність, яка описує вплив ширини рейок із ВЖД на формостійкість комбінованих столярних плит, що дає змогу раціонально вибирати їхні розміри на етапі проектування.

References

1. **Ashkenazi E.K.** (1978) *Anizotropiya drevesiny i drevesnykh materialov* [Anisotropy of wood and wood materials]. *Forest industry, Moscow*, 224.
2. **DIN 68705-2:2014-10** Plywood – Part 2: Blockboard and laminboard for general use. Germany, (in Deutsch).
3. **Gayda S.V.** (2000) Матеріали для виготовлення виробів з деревини / Materials for the Production of wood Products. – Lviv: BMC. – 160 p., (in Ukrainian).
4. **Gayda S.V.** (2007) Research of concentration of operations is in modern furniture Production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 33, 73-79, (in Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/42073314>
5. **Ferents O.B.** (2006). To develop science-based norms of wood consumption in the manufacture of joinery-building products / Report on research work]. – Lviv: UNFU, 2006. – 144 p. (in Ukrainian).
6. **Gayda S.V.** (2009) The effective use of post-consumer wood is basis for diminishing of CO₂-emission. *Scientific Herald UNFU*, 19.14, 72-89, (in Ukrainian).
7. **Gayda S.V.** (2010) A comparative analysis of physical and mechanical parameters of variously designed glued boards made of post-consumer recovered wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 36, 81-91. <https://doi.org/10.36930/42103612>
8. **Gayda S.V.** (2011) Comparative analysis of bending particularities for various post-consumer wood species and age categories. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 37.1, 84-88, (in Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/421137121>
9. **Gayda S.V.** (2012) Production techniques and properties of fuel pellets produced from post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 38, 112-150. <https://doi.org/10.36930/42123822>
10. **Gayda S.V.** (2013). Techniques for utilization of post-consumer wood in the production of fuel pellets and briquettes. Proceedings of the XXI International symposium Adhesives in Woodworking Industry (Slovakia, Zvolen Juve 23-26. 2013). TU Zvolen, 119-130.
11. **Gayda S.V.** (2013). Розроблення технології виробництва паливних гранул на основі енергетичного потенціалу вживаної деревини [Development of technology for the production of fuel pellets based on the energy potential of used wood]. *Scientific Bulletin of UNFU* 23.14:83-93. (in Ukrainian).
12. **Gayda S.V.** (2013). The technological solutions for recycling of post-consumer wood. Proceedings of I International Conference (Ukraine, 14-16 March 2013) UNFU: Lviv, 5-11.
13. **Gayda S.V.** (2013). The technologies and recommendations for the use of post-consumer wood in wood processing. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 39(1).48-67, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42133909>
14. **Gayda S.V.** (2013). Основи формування класифікатора вторинних деревинних ресурсів [Bases of secondary wood resources classifier formation]. *Scientific Works of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine* 11:208-215 (in Ukrainian). <https://fasu.nltu.edu.ua/index.php/nplanu/article/view/355>
15. **Gayda S.V.** (2013) Technologies and recommendations on the utilization of post-consumer wood in woodworking industry. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 39.1, 48-67, (in Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/42133909>
16. **Gayda S.V.** (2013) *The technological solutions for recycling of post-consumer wood*. Proceedings of I International Interdisciplinary Scientific Conference *Formation of stable outlook as the basis of sustainable development* (Ukraine, Lviv, 14-16 March 2013) UNFU: Lviv, 5-11.

17. **Gayda S.V.** (2013) Resource-saving technologies of recycling of post-consumer wood. *Scientific Bulletin of NULES of Ukraine: Technology and Energy* 185(2), 271-280, (in Ukrainian).
18. **Gayda S.V.** (2014). *Teoreticheskoye obosnovaniye podkhoda po prognozirovaniyu prochnosti drevesnostruzhechnykh plit iz vtorichno ispol'zuyemoy drevesiny* [The theoretical rationale for the approach on the prediction the strength of particleboard from recycled wood]. *Actual problems* 38:212-216.
19. **Gayda S.V.** (2014) Techniques for recycled of post-consumer wood in the production of quality particleboard. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 40, 41-51.
20. **Gayda S.V.** (2014) *Teoreticheskoye obosnovaniye podkhoda po prognozirovaniyu prochnosti drevesnostruzhechnykh plit iz vtorichno ispol'zuyemoy drevesiny* [The theoretical rationale for the approach on the prediction the strength of particleboard from recycled wood]. *Actual problems* 38:212-216.
21. **Gayda S.V.** (2014) *Sposoby podgotovki k pererabotke vtorichno ispol'zuyemoy drevesiny iglofrezernymi i shchotochnymi stankami* [Preparation methods for processing of post-consumer wood needle-milling and brushing machines]. *Actual problems of forest complex* 40, 65-69.
22. **Gayda S.V.** (2015) *Tekhnologii i fiziko-mekhanichni vlastivosti stolyarnykh plit iz vzhivanoi derevini* [Technology and physical and mechanical properties blockboard made of post-consumer wood]. *Technical service of agriculture, forestry and transport systems* 3(1), 145-152 (in Ukrainian).
23. **Gayda S.V.** (2015) *Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv vtorichno ispol'zuyemoy drevesiny* [Investigation of physical and mechanical properties of post-consumer wood]. *Actual problems of forest complex* 43, 175-179,.
24. **Gayda S.V.** (2016). Ecological and technological aspects of recycling post-consumer wood for production compacted materials]. *Lesnoy vestnik / Forestry bulletin of MSFU* 20(3).15-22.
25. **Gayda S.V.** (2016). Технологічні підходи до поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом [Technological approaches to cleaning of surface of post-consumer wood of needle-milling tools]. *Bulletin of KhNTUA* 178:3-11(in Ukrainian).
26. **Gayda S.V.** (2016). A investigation of form of stability of variously designed blockboards made of post-consumer wood // *ProLigno: Scientific Journal. «TRANSILVANIA» din Brasov.* 12(1).22-31.
27. **Gayda S.V.** (2016). Research on physical and mechanical characteristics of front blockboards made from post-consumer wood // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry.* 42:33-50. doi: <https://doi.org/10.36930/42164206>
28. **Gayda S.V.** (2017). A technology and properties of furniture board (FB) made of post-consumer wood (PCW). *Actual problems of forest complex* 48:34-38.
29. **Gayda S.V.** (2017). Using fuzzy expert systems for decision support in the process of post-consumer wood sorting. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 43:5-20 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42174301>
30. **Gayda S.V.** (2018). A investigation and analysis of characteristics of solid furniture boards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 44:15-25 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184402>.
31. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). *Bulletin of KhNTUA* 197:3-9, (in Ukrainian).
32. **Gayda S.V.** (2019). Scientific and technical basis of the use of used wood in woodworking: thesis of the Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.23. – Lviv: UNFU. – 465 (in Ukrainian).
33. **Gayda S.V.** (2023). State and analysis of the dynamics indicators of the production volume of the wood-working and furniture industry. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 4-19 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234901>
34. **Gayda S.V.** (2023). Determination of the circularity indicator in the forest sector according to the principles of the circular economy . *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 99-114, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234908>
35. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2018). Shape stability as a quality criterion for PCW-made blockboards. *Scientific Works of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine* 17:185-192 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.15421/412135>
36. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2020). Determining the regime parameters for the surface cleaning of post-consumer wood by a needle milling tool. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 [1 [107]], 89–97. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212484>.
37. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2020). The investigation of properties of blockboards made of post-consumer wood. *Poznan : Drewno*, 63 [206], 77-102. doi: <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.352.10>.
38. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2021). Properties of used wood as a determining factor in the quality of furniture products. *Scientific Works of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine* 23:152-162, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.15421/412135>

39. Gayda S.V., Kiyko O.A. (2023). Study of Physical and Mechanical Properties of Post-Consumer Wood of Different Age. *Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty* 66 (212). 00010. <https://doi.org/10.53502/wood-177453>.
40. Gayda S.V., Kiyko O.A., Guz M.M. (2022). Research of the structure of stump and rootwood for effective use in the production of wood products. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 2022, Vol. 64 (3), 131–142, doi: <https://doi.org/10.2478/ffp-2022-0011>
41. Gayda S.V., Kushpit A.S., Huber Yu.M. (2023). Analysis of implementation of Industry 4.0 principles in furniture production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 73-84, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234906>
42. Gayda S.V., Lesiv L.E. (2023). Mathematical model of forecasting volumes of post-consumer wood production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49:33-47, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234903>
43. Gayda S.V., Maksymiv V.M. (2007) Analysis, features, problems and experience of the use of additional resources of raw material – wastes and of used wood // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 33:63-73. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/42073313>
44. Gayda S.V., Maksymiv V.M. (2010) From recycled post-consumer wood towards prime quality particleboard. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 36, 57-77.
45. Gayda S.V., Voronovich V.V. (2011) Investigation of the features of bending of post-consumer wood. *Proceedings of the Conference, Mari State University*, 190-192.
46. Gayda S.V., Voytovych I.G. (2017). Durability and stability of elements for beam furniture products made from post-consumer wood are investigated. *Bulletin of KhNTUA* 189:62-70.
47. Gayda S.V., Voytovych I.G., Orikhovskyy R.Ya. (2020). Research of technological processes of production of legs of tables of various designs. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 46:36-49, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42204604>
48. Gayda, S. (2011) The investigation of physical and mechanical properties of wood particleboards made from post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 37.2, 95-110. <https://doi.org/10.36930/421137221>
49. Gayda, S. (2011) Recycled of post-consumer wood is for the production of particleboard in Ukraine. *Proceedings of the XXI International symposium Adhesives in Woodworking Industry (Slovakia, Zvolen June 29 – July 01. 2012). TU Zvolen*, 108-121.
50. Gayda, S., Dyak, T. (2011). The analysis of economic efficiency of post-consumer wood use for particleboard manufacture for LLC Swisspan Limited // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 37.2:129-136. doi: <https://doi.org/10.36930/421137221>
51. Gayda, S.V. (2007). Проблема деревної сировини у Європі та Україні / *Problema derevnoyi syrovyny u Yevropi ta Ukrayini* [A problem of arboreal raw material is in Europe and Ukraine]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 33:55-63 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/42073312>
52. Grytsak S.A., Gayda S.V. (2020). Comparative analysis of physical and mechanical characteristics of bent elements from different tree species. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 46:16-27 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42204602>
53. Grytsak S.A., Gayda S.V., Kushpit A.S., Salapak L.V. (2023). Analysis of the efficiency of structural and technological solutions in the production of component units of lattice furniture products. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 61-72, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234905>
54. Hoffman, S.; Dotson, N.; Lima, V.; Gray, Ch. (2024). Hoffman et al., 2024_supplemental. figshare. Online resource. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.25122929.v2>
55. Koryachko V.A., Kushpit A.S., Kushpit O.M., Andrashek Yo.V. (2016). The study of the blockboard shape stability depending on the design. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 42: 28-33.
56. Kryvyk O.O., Mayevskyy V.O. (2011) Dynamics of shape stability change for glued panels with a combination of different wood species. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 37(1), 30-33.
57. Laufenberg T, Ayrilmis N, White R (2006) Fire and bending properties of blockboard with fire retardant treated veneers. *Holz als Roh- und Werkstoff. Vol. 64(2)*, 137–143.
58. Lesiv L.E. (2022). Study of the characteristics of combined of blockboards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. 48:69-86, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214806>
59. Mamdani E.H. (1974). Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant / E.H. Mamdani // *Proc. IEEE* 121, 1974. – P. 1585-1588.
60. Matsyshyn Ya. (2014). Using genetic fuzzy expert systems for decision support in the automated process of solid wood cutting / Ya. Matsyshyn, V. Mayevskyy, M. Mysyk // *ProLigno : Scientific Journal. «TRANSILVANIA» din Brasov*. – 2014. – Vol. 12. No.1. – P. 10-21.

61. **Medvid L.M.** (2021). Post-consumer wood – an additional reserve of raw materials for construction materials. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 47:34-46, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214706>
62. **Medvid L.V.** (2018). Systematization of wood waste – the basis of their effective use // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 44: 91-104, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184412>
63. **Medvid L.V., Gayda S.V.** (2023). Determination of the strength indicators of normal blockboard made of post-consumer wood . *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 85-98, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234907>
64. **Murray A., Skene K., Haynes K.** (2017). The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *J. Bus. Ethics*, № 140(3). P. 369-380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>.
65. **Ovcharenko VA Podlyesnyy SV, Zinchenko SM.** (2008) *Osnovi metodu kintsevikh elementiv i yogo zastosuvannya v inzhenernikh rozrakhunkakh* [Fundamentals of the finite element method and its application in engineering calculations]. DSEA, Kramatorsk., 380.
66. **Pardaev A.S.** (2008) *Modelirovanie fiziko-mekhanicheskikh svoystv drevesiny pri konechno-elementnom analize stolyarnykh izdeliy* [Modelling of physical and mechanical properties of wood in the finite element analysis joinery] *Collection Bulletin USTU, Ekaterinburg. Vol. 3*, 77-83.
67. **Pardaev A.S.** (2009) *Povyshenie formoustoychivosti kleenykh shchitov iz drevesiny na osnove modelirovaniya protsessov usushki i razbukhaniya* [Increased form stability glued board of wood based on process modeling shrinkage and swelling] *Architecture and Construction. Vol. 3*, 30-32.
68. **Podibka, T.I., & Kiyko, O.A.** (2019). A study of the influence of the transverse dimensions of beech of strips on the form of stability of furniture board. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 45, 155-171. <https://doi.org/10.36930/42194521> (in Ukrainian).
69. **Suominen T., Kunttu J., Jasinevičius G., Tuomasjukka D. & Lindner M.** (2017). Trade-offs in sustainability impacts of introducing cascade use of wood, *Scandinavian Journal of Forest Research*,
70. **Titus, B.D., Brown, K., & Helmisaari, HS. et al.** (2021). Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines. *Energ Soc* 11, 10. <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00281-w>.
71. **Tuomasjukka D., Athanassiadis D. & Vis M.** (2017). Threefold sustainability impact assessment method comparison for renewable energy value chains, *International Journal of Forest Engineering*, 28:2, 116-122, doi: <https://doi.org/10.1080/14942119.2017.1318549>.
72. **Werner F., Taverna R., Hofer P., Thürig E., Kaufmann E.** (2010). National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. *Environ. Sci. Pol.*, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.10.004>.
73. **Xu, X.; Lu, Y.; Vogel-Heuser, B.; Wang, L.** (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0 – Inception, conception and perception. *J. Manuf. Syst.* 61:530-535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>.
74. **Zienkiewicz O.C.** (1977) *Finite Element Method in Engineering Science*. McGraw-Hill, 521.
75. **Гайда С.В.** Аналіз динаміки показників основних конструкційних матеріалів в контексті циркулярної економіки. *Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть.* – 2024, вип. 50. – С. 29-40. doi: <https://doi.org/10.36930/42245003>
76. **Гайда С.В.** Аналіз тенденцій обсягів виробництва конструкційних матеріалів в Україні та Європі. *Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть.* – 2025, вип. 51. – С. 33-48. doi: <https://doi.org/10.36930/42255103>
77. **Гайда С.В.** Аналіз тенденції основних показників деревозаготовчої галузі в контексті циркулярної економіки. *Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть.* – 2024, вип. 50. – С. 4-15. doi: <https://doi.org/10.36930/42245001>
78. **Гайда С.В.** Визначення характеристик столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез доповідей міжнародної НПК (05-06.06.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 118-120. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17079555>
79. **Гайда С.В.** Встановлення показника циркулярності в лісовому секторі: матеріали тез доповідей XIV Міжнародної НПК (23-24.05.2024). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.2. – С. 192-194.
80. **Гайда С.В.** Динаміка показників деревозаготовчої галузі в контексті циркулярної економіки. *Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть.* – 2025, вип. 51. – С. 4-16. doi: <https://doi.org/10.36930/42255101>
81. **Гайда С.В.** Основи створення гнучких виробничих систем. Гнучкі автоматизовані виробництва та робототехніка в деревообробці: Ч.1. – Львів: ЦНТЕІ, 1998. – 149 с.
82. **Гайда С.В.** Реалізація принципів циркулярної економіки в лісовому секторі: матеріали тез Н-ПК (24-25.05.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 110-112. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
83. **Гайда С.В.** Технології вживаної деревини як дієві механізми для реалізації принципів циркулярної економіки: матеріали тез НПК (05-06.06. 2025). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 137-139.

84. Гайда С.В., Гузь М.М., Никитюк Л.О. Корневая древесина-источник дополнительного сырья для плитного производства. Тези (21-25.09.1992). Архангельск: ЦНИИМОД. – С. 88-89.
85. Гайда С.В., Кшивецкий Б.Я. Оперативно-виробниче планування гнучких виробничих систем // Метод. вказівки. – Львів : ЦНТЕІ, 2000. – 29 с.
86. Гайда С.В., Кшивецкий Б.Я. Проектування гнучких виробничих систем: Метод. вказівки. – Львів : ЦНТЕІ, 1998. – 34 с.
87. Гайда С.В., Лесів Л.Е. Міцність комбінованих столярних плит із вживаної деревини ялиці: матеріали тез доповідей всеукраїнської НПК (24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 128-130. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
88. Гайда С.В., Лесів Л.Е. Побудова моделі міцності зрощених заготовок із вживаної деревини ялиці: матеріали тез Н-ПК (7-8.10.2024 р.). – Харків : ДБТУ, 2024. – С. 187-189. <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/conf-07-08-10-24-mater.pdf>
89. Гайда С.В., Лесів Л.Е. Порівняльний аналіз комбінованих столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез XIV МН-ПК (23–24.05.2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 215-217.
90. Гайда С.В., Луценко А.О. Гнучкі деревообробні виробництва – база для реалізації та адаптації САД-систем на основі Imos для проектування виробів із деревини: матеріали тез Н-ПК (24-25.05.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 131-133. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
91. Гайда С.В., Медвідь Л.В. Дослідження міцності при статичному згині столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез доповідей всеукраїнської НПК (7-8.10 .024 р.). – Харків : ДБТУ, 2024. – С. 193-195. <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/conf-07-08-10-24-mater.pdf>
92. Гайда С.В., Медвідь Л.В. Міцність звичайних столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез XIV МН-ПК (23–24.05.2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 213-214.
93. Гайда С.В., Медвідь Л.В. Побудова математичної моделі міцності столярних плит різних конструкцій із вживаної деревини. Наукові праці Лісівничої академії наук України : зб. наук. праць. – 2024, вип. 27. – С. 180-189. <https://doi.org/10.15421/412426>
94. Гайда С.В., Медвідь Л.В. Технологія поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом: матеріали тез Н-ПК (24-25.05.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 134-136. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
95. Гайда С.В., Подібка Т.І. Вплив товщини рейок на формостійкість меблевих щитів: Матеріали тез доповідей XV МНПК (22-23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.1. – С. 184-186. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
96. Гайда С.В., Подібка Т.І. Забезпечення площинності меблевих щитів із бука європейського: матеріали тез доповідей всеукраїнської НПК (24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 137-139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
97. Гайда С.В., Подібка Т.І. Формостійкість меблевих щитів із сосни звичайної: матеріали тез доповідей XIV Міжнародної НПК (23–24.05.24). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 211-212.
98. Гайда С.В., Удовичий О.М., Салабай Р.Г. Міцність столярно-будівельного погонажу із зрощених MDF-заготовок: Матеріали тез XV МН-ПК (22-23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.2. – С. 150-151. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
99. Гайда С.В., Ференц О.Б. Порівняльний аналіз альтернативних технологій дерев'яного будинкобудування. Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть. – 2025, вип. 51. – С. 49-63. doi: <https://doi.org/10.36930/422255104>
100. Гайда, С.В. Перспективи роботизації меблевої промисловості України. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2003. – Вип. 11 – С. 36-37.
101. Гайда, С.В. Прогресивні плитні матеріали MDF та OSB. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 1 – С. 30-32.
102. Гайда, С.В. Що нам важко стілець зробити? Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 3 – С. 44-52.
103. Грицак С.С., Грицак С.А., Гайда С.В. Встановлення залежності довжини бездефектної дуги деревини ясена від змінних факторів гнуття: Матеріали тез XV МН-ПК (22-23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.1. – С. 196-198. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
104. Киянка В.В., Гайда С.В. Визначення динаміки утворення деревинних залишків та відходів виробничої діяльності на ТзОВ «Фортуна-меблі». Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть. – 2024, вип. 50. – С. 103-116. doi: <https://doi.org/10.36930/42245009>
105. Лесів Л.Е., Гайда С.В. Залежність міцності зрощених заготовок від характеристик зубчастого з'єднання: Матеріали тез XV МН-ПК (22-23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.1. – С. 192-194. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
106. Гайда С.В. Матеріали для виготовлення виробів з деревини: Навч. пос. – Л.: ВМС, 2000. - 160 с.

107. Лесів Л.Е., Гайда С.В., Салапак Л.В. Розроблення математичної моделі міцності зрощених заготовок із вживаної деревини ялиці. Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть. – 2024, вип. 50. – С. 16-28. doi: <https://doi.org/10.36930/42245002>
108. Луценко А.О., Гайда С.В., Кійко О.А. Адаптація програмного забезпечення для мобільних та гнучких меблевих виробництв: Матеріали тез XV МН-ПК (22-23.05.2025 р.). – Чернігів: НУ «ЧП», 2025. – Т.1. – С. 173-174. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
109. Максимів В.М., Гайда С.В. Аналіз, особливості, проблеми та досвід використання додаткових ресурсів сировини – відходів та вживаної деревини. Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть. – 2007, вип. 33. – С. 63-73. <https://doi.org/10.36930/42073313>
110. Медвідь Л.В., Гайда С.В. Математична модель формостійкості звичайних столярних плит із вживаної деревини: Матеріали тез XV МН-ПК (22-23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.1. – С. 188-190. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
111. Оріховський Р.Я., Гайда С.В. Оцінювання ефективності використання робочого часу в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва. Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть. – 2024, вип. 50. – С. 41-51. doi: <https://doi.org/10.36930/42245004>
112. Оріховський Р.Я., Гайда С.В., Грицак С.А., Салапак Л.В. Вибір послідовності продуктивностей верстатів в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва. Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть. – 2025, вип. 51. – С. 17-33. doi: <https://doi.org/10.36930/42255102>
113. Удовиський О.М., Гайда С.В. Салабай Р.Г. Некондиційна деревина у бетонних виробках: Матеріали тез доповідей XV МНПК (22-23.05.25). – Чернігів : ЧП, 2025. – Т.2. – С. 141-142. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>

UDC 674-419.33:674.8

Post-graduate student L.E. Lesiv – UNFU

Theoretical substitution of the patterns of the influence of components from post-consumer wood on the physical and mechanical characteristics of combined blockboards

The use of Post-consumer wood (PCW) in the production of blockboards is a relevant direction aimed at the rational use of secondary resources and reducing the shortage of primary wood. The article provides a theoretical justification of the patterns of influence of the constituent elements of PCW-made blockboards on their physical and mechanical characteristics. The main attention is paid to the analysis of the stress-strain state of the boards, dimensional stability and durability of structures taking into account the anisotropy of the material. An approach to predicting the characteristics of blockboards based on the finite element method (FEM) is proposed, which allows modeling the behavior of structures under conditions of variable humidity and temperature. It is established that orthogonal, cylindrical and transversal schemes can be used to describe the anisotropy of wood, the choice of which depends on the orientation of the fibers and the size of the rails. The feasibility of using a cylindrical coordinate system for analyzing the dimensional stability of boards in the processes of shrinkage and swelling is substantiated, especially when the curvature of the annual layers significantly affects the quality of the product. An applied method for calculating the physical and mechanical characteristics of PCW rails has been developed, taking into account anisotropy and changes in humidity and temperature conditions of the environment. The proposed mathematical models make it possible to predict the strength and dimensional stability of blockboards depending on the design parameters and operating conditions, as well as to optimize structures at the design stage. The optimal ratio of the cross-section of rails (1:3) and the recommended angle of inclination of annual layers (not less than 60°) have been established, which contributes to reducing the amount of rutting. For the first time, a mathematical dependence has been obtained that describes the influence of the width of PCW rails on the dimensional stability of the plates, which allows rational selection of structural parameters. The results of the study confirm that the use of FEM and new mathematical models increases the accuracy of predicting the properties of PCW-made blockboards, contributes to the development of new design solutions and ensures their strength, reliability and durability.

Keywords: post-consumer wood (PCW), blockboard (BB), physical and mechanical characteristics, finite element method, anisotropy, modeling, dimensional stability, groovedness, structural optimization.
