

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

**ЛІСОВЕ ГОСПОДАРСТВО,
ЛІСОВА, ПАПЕРОВА
І ДЕРЕВООБРОБНА
ПРОМИСЛОВІСТЬ**

**Forestry, Forest, Paper
and Woodworking Industry**

НАУКОВИЙ ФАХОВИЙ ЗБІРНИК

Виходить з 1964 р.

ВИПУСК 51

Львів – 2025

УДК 691.11. Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість : науковий фаховий збірник. – 2025, вип. 51. – 152 с.

Підготовлено НЛТУ України та рекомендовано до друку Вченою Радою (протокол №11 від 22.12.25 р.).

У збірнику наукових праць «Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість» наведено результати сучасних досліджень і практичних розробок у сфері деревообробних, меблевих та будівельних технологій і технологій захисту навколишнього середовища. У збірнику висвітлено тематичні напрями, що охоплюють: деревообробні та меблеві технології; будівництво та цивільну інженерію; технології захисту навколишнього середовища. Розглядаються нові аспекти ресурсозберігаючих та екологічно чистих технологій деревообробки, виробництва меблів та дерев'яного будинкобудування. Збірник **призначено** для науковців, викладачів, аспірантів, докторантів і магістрів технічних, екологічних та лісотехнічних спеціальностей, а також фахівців деревообробної, меблевої, паперової та будівельної промисловості, які займаються науковими дослідженнями і впровадженням інновацій у галузях використання деревини та захисту довкілля.

Адреса НЛТУ України: 79057, м. Львів-57, вул. Ген. Чупринки, 103

Адреса редакції: 79057, м. Львів-57, вул. Залізняка, 11

тел. : (032) 238-44-96, 258-31-75; моб. : 067-79-12-522

e-mail: serhiy.hayda@nltu.edu.ua ; volodymyr_mayevskyy@nltu.edu.ua

<https://forest-woodworking.nltu.edu.ua/index.php/journal>

Голова редакційної колегії : В.О. Маєвський, д.т.н., проф.

Заступник голови редакційної колегії :

С.В. Гайда, д.т.н., проф.

Склад редколегії :

Вчені організації замовника (НЛТУ України):

В.О. Маєвський, д.т.н., проф.; С.В. Гайда, д.т.н., проф.; О.А. Кійко, д.т.н., проф.; Р.О. Козак, д.т.н., проф.; Б.Я. Кшивецький, д.т.н., проф.

Вчені закордонних організацій:

Томаш Криштофіяк, д.габ., проф., (Польща); Ян Сідлячік, д.габ., проф., (Словаччина); Петер Шпатгельф, д.габ., проф., (Німеччина); Василь Доненко, д.габ., проф., (Ізраїль); Ірина Мацях, д.габ., проф., (Швеція); Юлія Трач, д.габ., проф., (Польща); Іван Сопушинський, д.габ., проф., (Німеччина).

Вчені інших національних організацій:

О.О. Пінчевська, д.т.н., проф.; Ю.В. Цапко, д.т.н., проф.; Т.М. Шналь, д.т.н., проф.; В.М. Жук, к.т.н., доц.; Д.П. Кіндзера, к.т.н., доц.

Відповідальний секретар : С.В. Гайда, д.т.н., проф.

Технічні секретарі : О.Л. Сторожук, к.т.н., доц., А.С. Кушпіт, к.т.н., доц.

Технічний редактор : Р.Б. Щупаківський, к.т.н., доц.

Літературний редактор : В.В. Дудок

Англомовний редактор : В.В. Лентяков

© Національний лісотехнічний університет України, 2025

ЗМІСТ

1. WOODWORKING INDUSTRY // ДЕРЕВООБРОБНА ПРОМИСЛОВІСТЬ	4
<i>С.В. Гайда // S.V. Gayda</i> ДИНАМІКА ПОКАЗНИКІВ ДЕРЕВИНОЗАГОТОВЧОЇ ГАЛУЗІ В КОНТЕКСТІ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ // Dynamics of the wood harvesting industry in the context of the circular economy	4
	16
<i>Р.Я. Оріховський, С.В. Гайда, С.А. Грицак, Л.В. Салапак // R.Ya. Orikhovskyy, S.V. Gayda, S.A. Grytsak, L.V. Salapak</i> ВИБІР ПОСЛІДОВНОСТІ ПРОДУКТИВНОСТЕЙ ВЕРСТАТИВ В АВТОМАТИЗОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМАХ ДЕРЕВООБРОБНОГО ВИРОБНИЦТВА // Choice of the sequence of productivity of machinery in automated production systems of the woodworking manufacturing	17
	33
<i>С.В. Гайда // S.V. Gayda</i> АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ ОБСЯГІВ ВИРОБНИЦТВА КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В УКРАЇНІ ТА ЄВРОПІ // Analysis of trends in the production volumes of construction materials in Ukraine and Europe	34
	48
<i>С.В. Гайда, О.Б. Ференц // S.V. Gayda, O.B. Ferents</i> ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЕРЕВ'ЯНОГО БУДИНКОБУДУВАННЯ // Comparative analysis of alternative technologies for wooden house construction	49
	63
<i>Л.В. Медвідь // L.V. Medvid</i> СТВОРЕННЯ АЛГОРИТМУ ФОРМУВАННЯ ЕТАПІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ З ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАГОТОВОК ДЛЯ СТОЛЯРНИХ ПЛИТ ІЗ ВЖИВАНОЇ ДЕРЕВИНИ // Creation of an algorithm for forming the stages of the technological process for manufacturing blanks for blockboards from post-consumer wood	64
	79
<i>Л.Е. Лесів // L.E. Lesiv</i> ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВПЛИВУ СКЛАДОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ВЖИВАНОЇ ДЕРЕВИНИ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМБІНОВАНИХ СТОЛЯРНИХ ПЛИТ // Theoretical substitution of the patterns of the influence of components from post-consumer wood on the physical and mechanical characteristics of combined blockboards	80
	93
<i>Ю.О. Козак // Yu.O. Kozak</i> ПОБУДОВА РЕГРЕСІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ ВПЛИВУ ЩІЛЬНОСТІ, ВОЛОГОСТІ ТА МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ // Building a regression model for predicting the strength of wooden structures based on the influence of density, moisture content and elastic modulus	94
	108
<i>В.В. Киянка, С.В. Гайда // V.V. Kyiynka, S.V. Gayda</i> РОЗРОБЛЕННЯ ШЛЯХІВ ВИКОРИСТАННЯ ДЕРЕВИННИХ ЗАЛИШКІВ ТА ВІДХОДІВ ВІД ПЕРЕРОБЛЕННЯ ДЕРЕВИННИХ ТА КОМПОЗИТНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ВИРОБНИЧОЇ ДІЯЛЬНОСТІ МЕБЛЕВОГО ПІДПРИЄМСТВА ТЗОВ «ФОРТУНА-МЕБЛІ» // Development of approaches for the utilization of wood residues and waste from the processing of wood and composite structural materials in furniture manufacturing at LLC «Fortuna-Mebli»	109
	123
<i>О.І. Голубчак, О.Р. Гнатюк, А.П. Іванюк // O.I. Holubchak, O.R. Hnatiuk, A.P. Ivaniuk</i> ОСОБЛИВОСТІ ЛІСОКОРИСТУВАННЯ В ГІРСЬКИХ ЗАХИСНИХ ЛІСАХ ПРИКАРПАТТЯ // Features of forest use in mountain protective forests of the Carpathian Region.	124
	134
<i>А.О. Луценко // A.O. Lutsenko</i> ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АДАПТИВНОГО ПРОЕКТУВАННЯ МЕБЛІВ У СЕРЕДОВИЩІ IMOS // Formulation of a mathematical model of adaptive furniture design within the IMOS CAD Environment	135
	150



Проф. С.В. Гайда¹, д-р техн. наук – НЛТУ України

ДИНАМІКА ПОКАЗНИКІВ ДЕРЕВИНОЗАГОТОВЧОЇ ГАЛУЗІ В КОНТЕКСТІ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ

Обґрунтовано проблеми лісопромислового комплексу в контексті циркулярної економіки, які можна описати такими моментами як можна описати наступним чином, роблячи акценти на таких моментах: втрата ресурсів на лісосіці, залишки у процесах перероблення, забруднення середовища, недоцільна лісозаготівля, що може призвести до втрати біорізноманіття, нестабільність ринку. Описано динаміку площі лісового фонду України в тис.га за сорокадворічний період з 1983 по 2025 рр., яка за даними Державного агентства лісових ресурсів України становить 10,4 млн. га. Представлено динаміку зміни запасів деревини в лісах України, млн.м³ за тридцятисемирічний період з 1988 по 2025 рр., яка станом 2025 р. становить 2,3 млрд.м³. Описано динаміку площі відтворення лісів в Україні, га за восьмирічний період з 2019 по 2024 рр., яка станом на 2025 р. становить 35,2 тис. га. Визначено динаміку заготівлі деревини в Україні, тис. м³ за шестирічний період з 2019 по 2025 рр. з індексами зростання та спадання: 2019/2020 – 85,42%; 2020/2021 – 99,01%; 2021/2022 – 90,28%; 2022/2023 – 98,49%; 2023/2024 – 94,98%. Проаналізовано динаміку заготівлі за деревними породами в Україні, тис. м³, аналіз якої засвідчує, що лісоматеріали хвойних порід складають 55,0-68,0 %, а твердолистяних порід значно менше – в діапазоні 25,0-33,0% від усієї заготовленої деревини. Встановлено, що при деревинозаготівлі у 2024 р. в обсязі 14905,8 тис.м³, як найнижчого показника за аналізований період, аналіз динаміки показників заготовлення деревини в контексті циркулярної економіки вимагав вивчення декількох ключових аспектів, зокрема сталості заготовлення деревини ліквідної деревини та перероблення залишків деревини від усіх процесів. Розписано та запропоновано комплексні шляхи вирішення проблем лісопромислового комплексу, які включають: створення замкнутого циклу використання ресурсів; розвиток технологій переробки, впровадження енергоефективних технологій виробництва та переробки деревини; стимулювання використання вторинної сировини; впровадження циркулярних бізнес-моделей; вирішення проблем щодо залучення вживаної деревини у виробничі процеси.

Ключові слова: ліс, деревина, деревинозаготовча галузь, лісовий фонд, запас деревини, відтворення лісів, деревинопромислове виробництво, вироби з деревини, динаміка показників, циркулярна економіка, вживана деревина.

Вступ. У сучасних умовах ресурсозбереження та мінімізації екологічних ризиків питання оптимізації лісокористування набуває особливої ваги [6, 17, 20, 22, 26, 28, 30, 33, 56, 59, 60, 71, 73, 77]. Український лісопромисловий комплекс, який відіграє ключову роль у забезпеченні національної економіки деревиною, стикається з низкою викликів у контексті переходу до циркулярної моделі виробництва та споживання. Незважаючи на значний обсяг лісових ресурсів – понад 10,4 млн га лісового фонду і 2,3 млрд м³ запасів деревини станом на 2025 р. – втрати під час рубок, залишки на переробних підприємствах і нераціональні практики заготівлі загрожують стійкості екосистем і ринку деревини [82]. Тут всебічно важливо проаналізувати динаміку ключових показників деревинозаготовчої галузі України за прийнятий період з урахуванням принципів циркулярної економіки. Зокрема, необхідно проаналізувати зміни площ лісового фонду та лісовідтворення, запаси

¹ Гайда Сергій Володимирович – академік Лісівничої академії наук України, доктор технічних наук, професор кафедри технологій меблів та виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-258-31-75, +38-067-791-25-22. E-mail: serhiy.hayda@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7468-5661> ResearcherID: ABB-1636-2021 Scopus/authorID=57221587964

деревини і обсяги заготівлі за останні декілька років, а також структуру заготовленої деревини за породним складом. Розглянути проблемні аспекти втрат ресурсів і забруднення середовища, проаналізувати індекси зростання та спадання обсягів заготівлі в 2019-2025 рр., а також окреслити шляхи підвищення ефективності використання вторинної сировини й впровадження новітніх технологій перероблення. Ураховуючи виявлені дисбаланси між наявними ресурсами та методами їх використання, необхідно надати рекомендації щодо створення замкнутих циклів виробництва, стимулювання циркулярних бізнес-моделей, застосування відновних джерел енергії й нарощування енергоефективності у лісовому господарстві. Такий підхід сприятиме не лише збереженню біорізноманіття та екологічній безпеці, а й стабільному розвитку лісопромислового комплексу України в умовах глобальних економічних викликів. Маючи розгалужену структуру та значний потенціал, основні компоненти лісопромислового комплексу України стикається з численними проблемами [17, 22, 26, 28, 33, 56, 59, 60, 71, 73], які потребують уваги, дослідження, аналізу та розв'язання.

Мета дослідження – провести комплексний аналіз динаміки ключових показників деревозаготовчої галузі України за період 1983–2025 рр. у контексті принципів циркулярної економіки, виявити основні проблеми ресурсозбереження та екологічні ризики на різних етапах лісозаготівлі й перероблення, а також розробити практичні рекомендації щодо впровадження замкнутих циклів використання деревини, ефективного використання вторинної сировини й енергоефективних технологій для підвищення стійкості лісопромислового комплексу.

Актуальність. Перехід до циркулярної економіки у світовому масштабі визначає нові пріоритети для лісопромислового комплексу України, зокрема оптимізацію використання деревинних ресурсів і мінімізацію відходів [1, 2, 9, 19, 27, 38, 40, 41, 73, 52, 54]. За останні чотири десятиліття спостерігається значна варіація у площі лісового фонду, запасах деревини та обсягах заготівлі, що вимагає системного перегляду підходів до лісокористування. В умовах зростаючих екологічних ризиків і глобальної кліматичної нестабільності актуально дослідити ці динамічні зміни крізь призму замкнутих циклів виробництва та споживання, щоб забезпечити сталий розвиток галузі та збереження біорізноманіття.

Проблемність. Незважаючи на значні лісові ресурси, галузь стикається з проблемами нераціонального вилучення деревини, втратами матеріалу на лісосіці й на стадії переробки, що призводить до зростання відходів і забруднення середовища. Відсутність широкого впровадження технологій повторного використання відходів та недостатній рівень енергоефективності підсилюють екологічні та економічні ризики, зокрема нестабільність ринку деревини й загрозу втрати біорізноманіття. Брак цілісних досліджень, які б поєднали аналіз динаміки виробничих показників із оцінкою потенціалу циркулярних моделей, створює прогалину у формуванні практичних рекомендацій для сталого управління лісовими ресурсами. Проблеми, з якими стикається лісопромисловий комплекс України, це, в першу чергу, несанкціонована вирубка лісів, неправильне лісокористування, незаконний обіг деревини та знищення лісів, що можуть призвести до втрати біорізноманіття, змін клімату та інших серйозних проблем екологічного характеру. А також недостатня охорона лісів від пожеж, шкідників та хвороб; недофінансування, корупція та відсутність адекватного управління, що, в кінцевому результаті, можуть приз-

вести до непродуктивного використання лісових ресурсів, що недопустимо з позицій циркулярної економіки. Розв'язання цих проблем в контексті циркулярної економіки передбачає розробку та впровадження нових технологій та методів [3, 5, 10, 14, 17, 20, 23, 26, 27, 31, 34, 35, 46, 53, 57, 58, 62, 66, 71, 81], що сприяють максимальному використанню ресурсів, включаючи використання вживаної деревини [6, 7, 20, 30, 37, 38, 55, 64, 65, 77], відновлювані енергійні джерела [4, 38, 47], зменшення відходів, а також розвиток сталого лісового господарства.

Стан деревообробної галузі як компонента лісопромислового комплексу. Деревообробна промисловість України є наступним етапом ланцюга доданої вартості після заготівлі деревини, що проявляється у створенні відповідних матеріалів [8, 11, 12, 13, 16, 21, 36, 39, 51, 59, 60, 63, 67, 68, 69, 72, 80]. Вона включає первинне та глибоке перероблення круглої деревини, виробництво пиломатеріалів, ДСП, фанери, меблевих комплектуючих, пакувальних матеріалів тощо. Стан галузі характеризується такими особливостями: Багато деревообробних підприємств мають застаріле обладнання та малу потужність, що не дозволяє повністю використовувати наявні обсяги круглої деревини. Частка глибокої переробки (композити, інженерна деревина) не перевищує 30–35 % від загального обсягу випуску, що знижує додану вартість і конкурентоспроможність продукції на зовнішніх ринках. Більшість підприємств орієнтуються на експорт низько- та середньоякісних пиломатеріалів, водночас внутрішній ринок відчуває дефіцит інноваційних та сертифікованих продуктів із високою доданою вартістю та відповідною якістю продукції [25, 34, 74]. Недостатнє впровадження стандартів FSC/PEFC унеможливорює доступ до преміальних європейських та американських ринків, де сертифікація є обов'язковою умовою закупівлі [17, 28, 32, 82].

Основні виклики для деревообробної та меблевої галузі:

- **Економічні:** Недостатній обсяг інвестицій у модернізацію обладнання та автоматизацію процесів, що призводить до високих експлуатаційних витрат і простотів. Коливання світових цін на деревину та пиломатеріали, залежність від валютного курсу та нестабільність попиту на експортних ринках. Відсутність інтегрованих ланцюгів доданої вартості: недосконала логістика, слабка кооперація між лісозаготівельниками та деревопереробниками.

- **Екологічні:** Велика кількість відходів деревини (тирса, обрізки), що переважно спалюється або накопичується без утилізації. Використання застарілих технологій із високим рівнем викидів забруднюючих речовин у повітря. Недостатній рівень сертифікації лісосировини та контролю легальності походження деревини, що провокує незаконну вирубку й погіршення стану біорізноманіття.

- **Соціальні:** Нестача кваліфікованих кадрів: молодь не прагне до роботи на перевантажених і потенційно небезпечних виробництвах без умов для професійного зростання. Недостатній рівень охорони праці та соціальних гарантій на дрібних підприємствах — високий відсоток травматизму та плинність кадрів. Обмежені можливості для розвитку та впровадження корпоративної соціальної відповідальності, слабка взаємодія з місцевими громадами.

Вирішення цих комплексних проблем потребує стратегічного поєднання модернізації виробництва, широкого впровадження циркулярних практик, розвитку людського капіталу та посилення екологічного та сертифікаційного контролю.

Детальний аналіз стану питання дає можливість зрозуміти динаміку цих показників [15, 17, 18, 19, 29, 42, 48, 49, 50, 61, 75, 78, 79].

Аналіз динаміки показників деревозготовчої галузі. За даними Державного агентства лісових ресурсів України на 2025 рік, загальна площа лісового фонду країни становила 10,400 млн. га (рис. 1), з яких 9600 тис. га вкрито лісовою рослинністю. Динаміка зростання площі лісового фонду України між аналізованими роками наступна : 1983/1988 – 100,38%; 1988/1996 – 109,04 %; 1996/2002 – 100,97%; 2002/2011 – 100,87%; 2011/2016 – 101,30%; 2016/2025 – 107,24%.

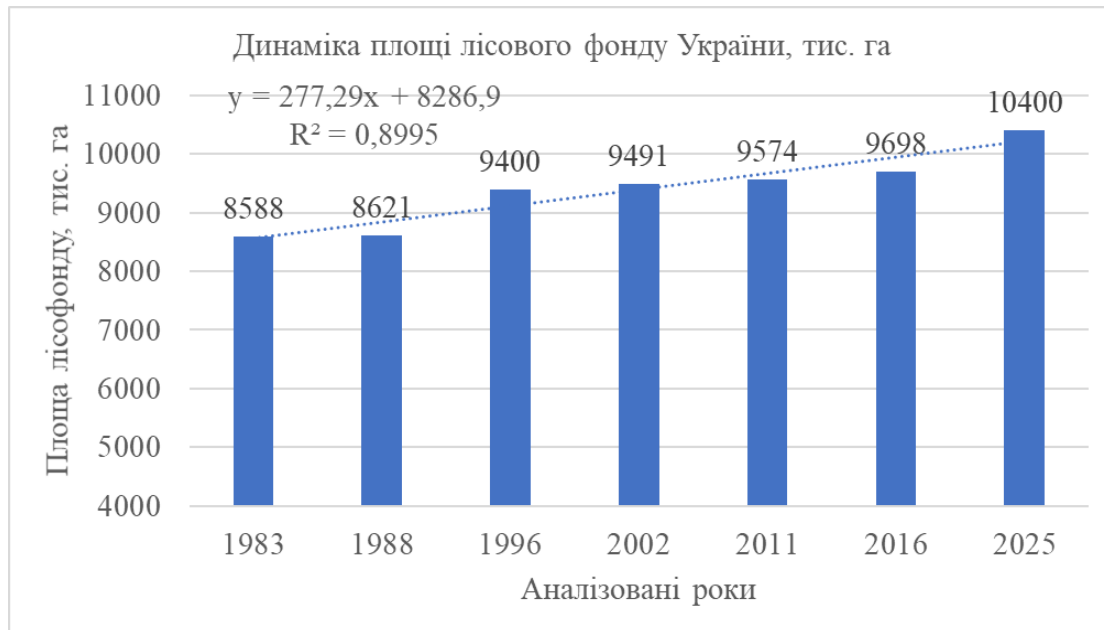


Рис. 1. Динаміка площі лісового фонду України в тис. га за сорокадворічний період з 1983 по 2025 рр. [17, 18, 19, 82]

Динаміка зміни лісистості України між аналізованими роками (рис. 2) наступна : 1983/1988 – 100,38 %; 1988/1996 – 109,04 %; 1996/2002 – 100,97%; 2002/2011 – 100,87%; 2011/2016 – 101,30%, 2016/2025 – 107,24%, 2025/2035 – 104,47%.

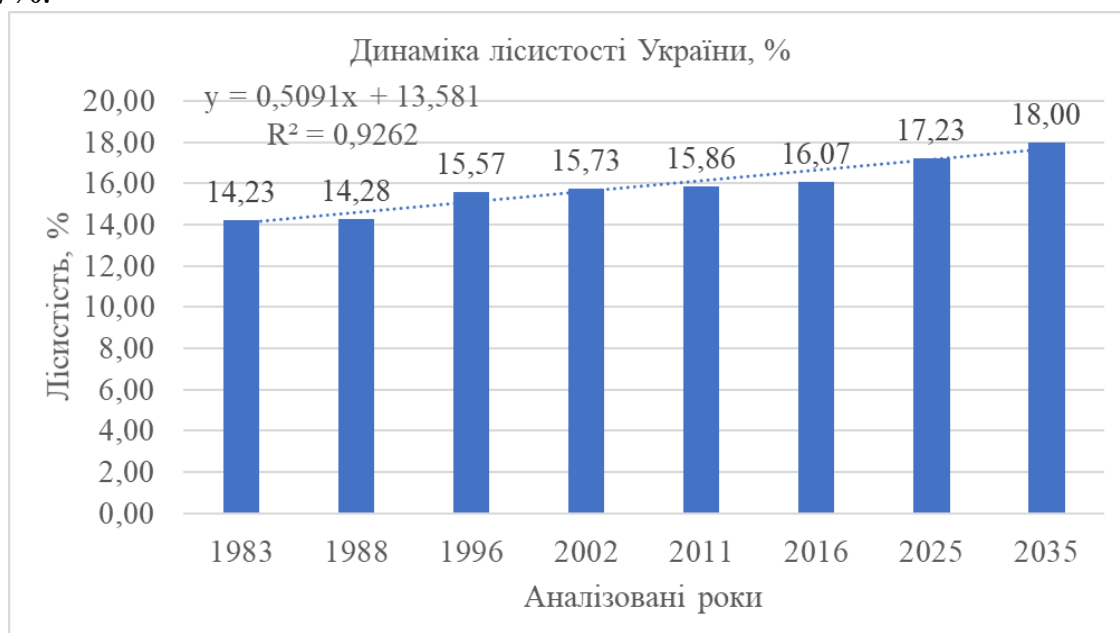


Рис. 2. Динаміка зміни лісистості України, % за п'ятидесятидворічний період з 1983 по 2035 рр. [17, 18, 19, 82]

Динаміка **зміни запасів деревини в лісах України** між аналізованими роками (рис. 3) наступна : 1988/1996 – 131,52 %; 1996/2002 – 109,45%; 2002/2014 – 110,47%; 2014/2025 – 109,58%.

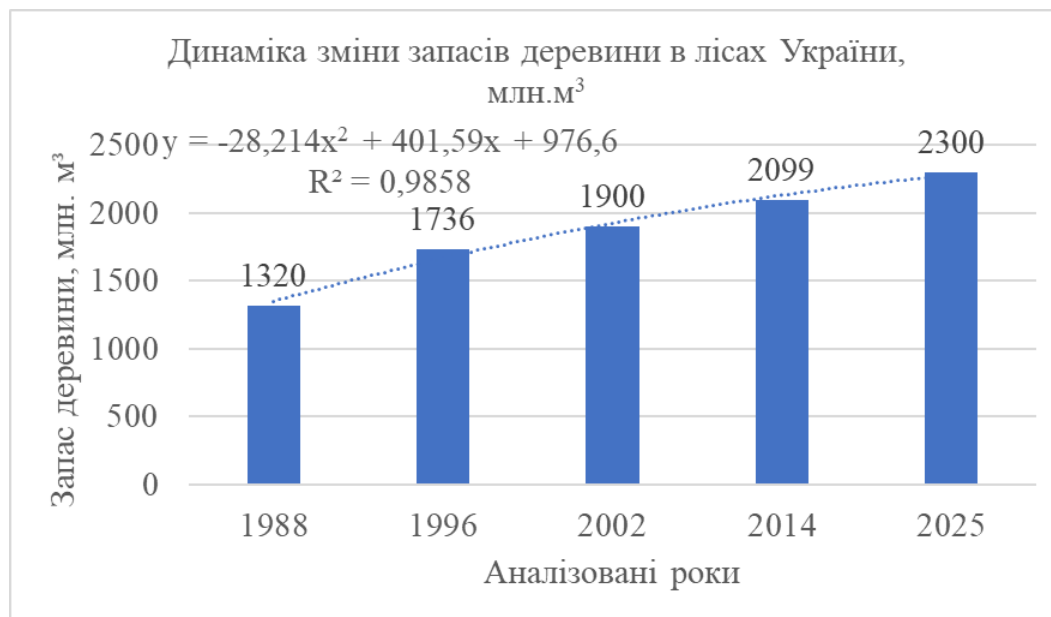


Рис. 3. Динаміка зміни запасів деревини в лісах України, млн.м³ за тридцятирічний період з 1988 по 2025 рр. [17, 18, 19, 82]

Процес відтворення лісів в Україні включає відновлення на лісових ділянках, які раніше були вкриті лісовою рослинністю, та лісорозведення на деградованих та малопродуктивних землях. Динаміка **площі відтворення лісів в Україні**, га між аналізованими роками (рис. 4) наступна : 2019/2020 – 91,73%; 2020/2021 – 110,17%; 2021/2022 – 74,67%; 2022/2023 – 111,82%; 2023/2024 – 85,45%.

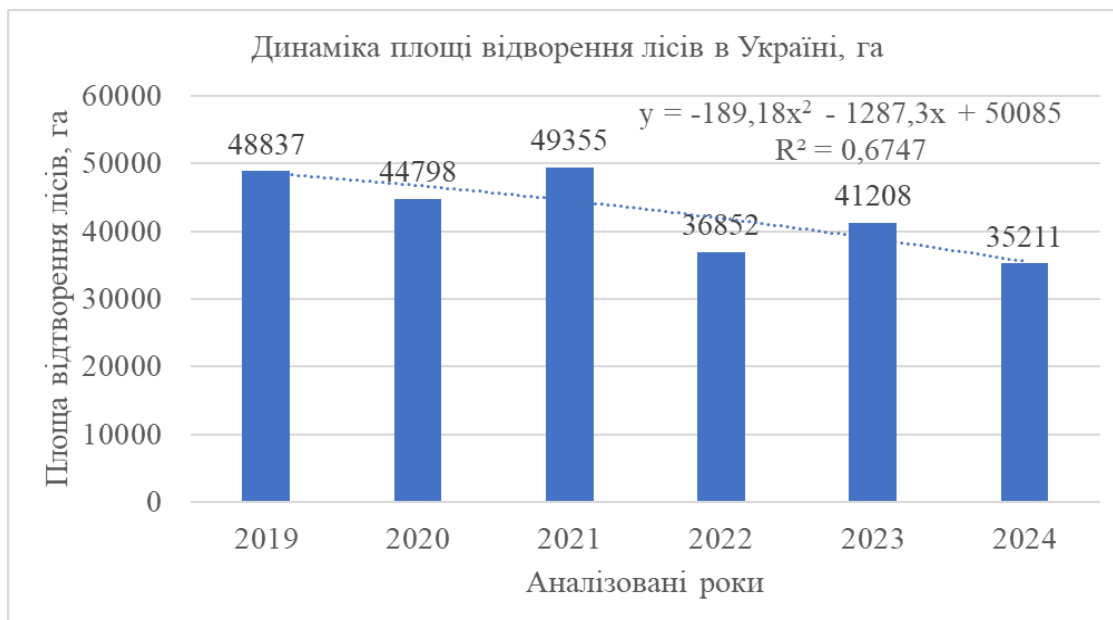


Рис. 4. Динаміка площі відтворення лісів в Україні, га за шестирічний період з 2019 по 2024 рр. [17, 18, 19, 82]

У теперішній час, основним завданням лісового господарства є забезпечення сталого розвитку лісової галузі, що передбачає збалансовану лісозаготівлю та раціональне використання лісових ресурсів, збереження їх екологічного та економі-

чного потенціалу. Аналіз динаміки показників заготовляння деревини в контексті циркулярної економіки вимагає вивчення декількох ключових аспектів, зокрема сталості заготовляння ліквідної деревини та перероблення залишків деревини від усіх процесів. Динаміка **заготівлі деревини в Україні, тис. м³** між аналізованими роками (рис. 5) наступна : 2019/2020 – 85,42%; 2020/2021 – 99,01%; 2021/2022 – 90,28%; 2022/2023 – 98,49%; 2023/2024 – 94,98%.



Рис. 5. Динаміка заготівлі деревини в Україні, тис. м³ за шестирічний період з 2019 по 2024 рр. [17, 18, 19, 82]

Лісові ресурси є основою для розвитку лісозаготівельного комплексу. Заготівля деревини за деревними породами подана на рис. 6. Динаміка **заготівлі деревини за хвойними породами в Україні, тис. м³** між аналізованими роками наступна : 2019/2020 – 84,48%; 2020/2021 – 93,52%; 2021/2022 – 81,99%; 2022/2023 – 102,97%; 2023/2024 – 97,07%. Динаміка **заготівлі деревини за твердолистяними породами в Україні, тис. м³** між аналізованими роками наступна : %; 2019/2020 – 81,16%; 2020/2021 – 105,86%; 2021/2022 – 105,85%; 2022/2023 – 91,21%; 2023/2024 – 96,73%.

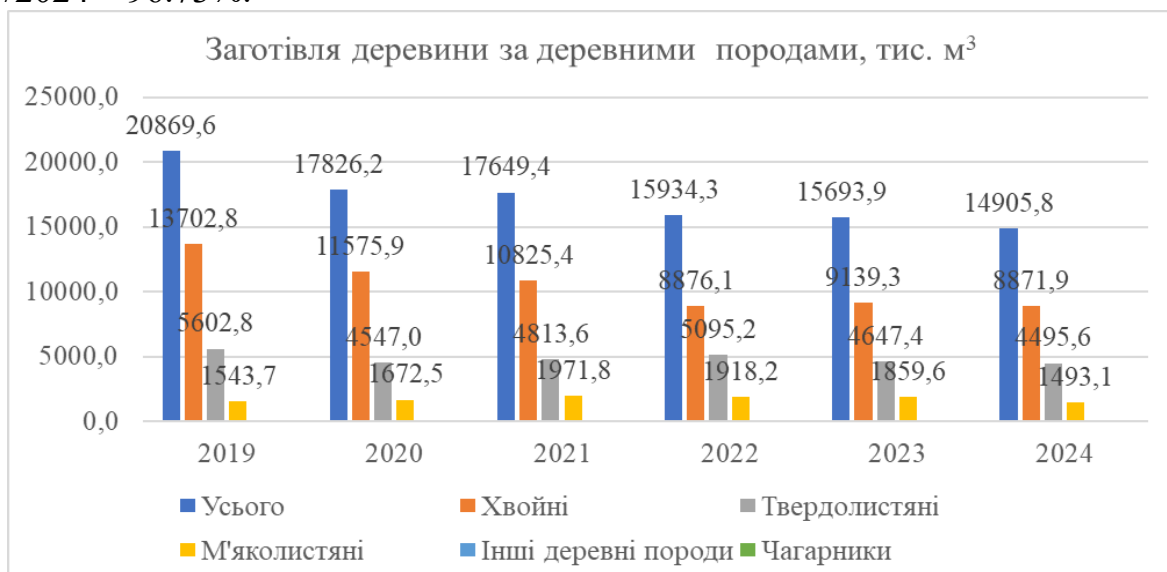


Рис. 6. Динаміка заготівлі за деревними породами в Україні, тис. м³ за шестирічний період з 2019 по 2024 рр. [17, 18, 19, 82]

Більша частина деревини, яка заготовлюється в Україні, становить лісоматеріали хвойних порід, які складають 55,7-67,5% від усієї заготовленої деревини. Лісоматеріали з твердолистяних порід значно менше – в діапазоні 24,9-32,0%. Решта порід, зокрема м'яколистяні займають невелику частку ринку.

В рамках циркулярної економіки, важливо враховувати, як залишки та відходи заготовляння деревини (такі як тирса, тріска, гілки, та тонкомір) переробляються та використовуються, зокрема для виробництва конструкційних щитових матеріалів. Реалізація ефективної державної політики в лісозаготівельній галузі вимагає урахування природних та господарських аспектів для збалансованого розвитку лісового господарства в Україні.

Обґрунтування комплексних шляхів вирішення виокремлених проблем деревозаготовчої та деревообробної галузі в контексті циркулярної економіки, суть яких полягає у наступному [1, 7, 23, 24, 45, 56, 70, 76, 83]:

1. Максимізація вторинної переробки та утилізації відходів:

- Впровадити пілотні лінії з переробки тирси й обрізків у пресовані брикети та гранули для опалення чи виробництва біопалива. Створити кластерні майданчики, де дрібні та середні деревообробні підприємства зможуть спільно інвестувати в обладнання для переробки відходів (MDF, OSB, паливні гранули).
- Запровадити систему роздільного збору та обліку відходів на всіх етапах переробки з метою відстеження й оптимізації обсягів вторсировини.

2. Очищення технологічних процесів і зменшення забруднення:

- Перехід на безводні й низькоемісійні клеї та лаки (на основі водних дисперсій, біополімерів) замість фенольних та формальдегідних складів.
- Інтеграція систем очистки стічних вод із біореакторами та багатоступеневими фільтрами на підприємствах із хімічною обробкою деревини. Використання електростатичного та циклонного очищення димових газів, а також впровадження систем повернення тепла від відпрацьованих газів у технологічні цикли.

3. Сталий менеджмент лісових ресурсів:

- Розробка й імплементація сертифікованої системи лісокористування (FSC, PEFC) із GPS-маркуванням і моніторингом кожної заготовленої партії деревини.
- Підтримка програми «зелених сертифікатів» для підприємств, що закуповують лише легально зрубану й сертифіковану деревину, із пільговим доступом до кредитних ліній. Запровадження практики селективної рубки й лісовідновлення з використанням місцевих генетичних матеріалів, що підтримує біорізноманіття та підвищує продуктивність лісів.

4. Підвищення енергоефективності та ресурсозбереження:

- Модернізація обладнання на деревообробних підприємствах із встановленням теплових насосів, рекуператорів тепла та індукційних сушильних камер.
- Використання комбінованих енергетичних установок (біогаз від відходів + сонячні панелі) для покриття власних потреб у електро- та тепловій енергії. Оптимізація логістики сировини й готової продукції через цифрові платформи (вантаження обсягів, маршрутизація), що зменшує витрати пального й викиди CO₂.

5. Розвиток циркулярних бізнес-моделей:

- Запровадження системи зворотного прийому дерев'яної тари, піддонів і будівельних матеріалів із метою їх ремонту або переробки.

- Створення «лізингових» моделей використання меблів та інтер'єрних конструкцій, коли виробник не просто продає виріб, а надає його в користування з подальшим обслуговуванням і оновленням.

- Партнерство з компаніями зі споживчого сектора (будівництво, меблева галузь) для спільного фінансування і апробації нових матеріалів на базі відходів.

6. Соціальна відповідальність і підвищення кваліфікації кадрів:

- Проведення регулярних тренінгів із безпеки праці та екологічних стандартів для лісорубів і операторів деревообробного обладнання.

- Створення програми сертифікації «Зелений працівник» із підтримкою державних грантів для малих підприємств, що пройшли навчання.

- Впровадження системи мотивації працівників за скорочення обсягів відходів і енерговитрат (бонуси, недержавне страхування здоров'я).

Застосування таких комплексних заходів дозволить не лише зменшити екологічний вплив деревообробної галузі, а й підвищити її економічну ефективність, зміцнити ринкові позиції та відповідати вимогам сучасної циркулярної економіки, яка направлена на ресурсо- та енергоефективність прогресивних деревообробних та меблевих технологій.

Висновки

1. Обґрунтовано проблеми лісопромислового комплексу в контексті циркулярної економіки, які можна описати такими моментами як можна описати наступним чином, роблячи акценти на таких моментах: втрата ресурсів на лісосіці, залишки у процесах перероблення, забруднення середовища, недоцільна лісозаготівля, що може призвести до втрати біорізноманіття, нестабільність ринку. Описано динаміку площі лісового фонду України в тис.га за сорокадворічний період з 1983 по 2025 рр., яка за даними Державного агентства лісових ресурсів України становить 10,4 млн. га.

2. Представлено динаміку зміни запасів деревини в лісах України, млн.м³ за тридцятисемирічний період з 1988 по 2025 рр., яка станом 2025 р. становить 2,3 млрд.м³.

3. Описано динаміку площі відтворення лісів в Україні, га за восьмирічний період з 2019 по 2024 рр., яка станом на 2025 р. становить 35,2 тис. га.

4. Визначено динаміку заготівлі деревини в Україні, тис. м³ за шестирічний період з 2019 по 2025 рр. з індексами зростання та спадання : 2019/2020 – 85,42%; 2020/2021 – 99,01%; 2021/2022 – 90,28%; 2022/2023 – 98,49%; 2023/2024 – 94,98%.

5. Проаналізовано динаміку заготівлі за деревними породами в Україні, тис. м³, аналіз якої засвідчує, що лісоматеріали хвойних порід складають 55,0-68,0 %, а твердолистяних порід значно менше – в діапазоні 25,0-33,0% від усієї заготовленої деревини.

6. Встановлено, що при деревинозаготівлі у 2024 р. в обсязі 14905,8 тис.м³, як найнижчого показника за аналізований період, аналіз динаміки показників заготовляння деревини в контексті циркулярної економіки вимагав вивчення декількох ключових аспектів, зокрема сталості заготовляння деревини ліквідної деревини та перероблення залишків деревини від усіх процесів.

7. Намічено стратегічні шляхи щодо розв'язання проблем деревинозаготовчої галузі в контексті циркулярної економіки, що передбачає розробку та впровадження нових технологій та методів, які сприяють максимальному використанню ресурсів, включаючи використання вторинної сировини, відновлювані енергійні джерела, зменшення відходів та забруднення, а також розвиток сталого лісового господарства.

8. Розписано та запропоновано комплексні шляхи вирішення проблем лісопромислового комплексу, які включають: створення замкнутого циклу використання ресурсів; розвиток технологій переробки, впровадження енергоефективних технологій виробниц-

тва та переробки деревини; продовження здійснення лісокористування в рамках сталого розвитку; стимулювання використання вторинної сировини; впровадження циркулярних бізнес-моделей; вирішення проблем щодо залучення вживаної деревини у виробничі процеси.

References

1. **Circular economy** industry platform. <http://www.circular.eu/project/renault-closed-loop/>
2. **Circularity Gap Report** (2022). Five years of analysis by Circle Economy https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/1_report_cgr_global_2022
3. **Gayda S.V.** (2007). Research of concentration of operations is in modern furniture Productions. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 33:73-79 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/42073314>
4. **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 June 23-26. 2013). TU Zvolen, 119-130.
5. **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).
6. **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>
7. **Gayda S.V.** (2013). Основи формування класифікатора вторинних деревинних ресурсів / *Osnovy formuvannya klasyfikatora vtorynnykh derevynnykh resursiv* [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>
8. **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.
9. **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.
10. **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).
11. **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.
12. **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>
13. **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.
14. **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>
15. **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>.
16. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). *Bulletin of KhNTUA* 197:3-9, (in Ukrainian).
17. **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).
18. **Gayda S.V.** (2023). State and analysis of the dynamics indicators of the production volume of the woodworking and furniture industry. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 4-19 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234901>

19. **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>
20. **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.
21. **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>
22. **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>.
23. **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>.
24. **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>
25. **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>.
26. **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>
27. **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>
28. **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>
29. **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>
30. **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.
31. **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>
32. **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>
33. **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>
34. **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>
35. **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>
36. **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>
37. **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>

38. **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>
39. **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>
40. **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>.
41. **Project «CircHive – Developing & piloting biodiversity footprinting & natural capital accounting via a ‘beehive’ of sectoral hubs, for sustainable transition to a circular EU bioeconomy».** Project Schedule: Start Date 01.12.2022 End Date 30.11.2027.
42. **Ratajczak E.** (2003). Zasoby odpadów drzewnych w Polsce / E. Ratajczak, A Szostak. Poznan: Czysza Energia,– Vol. 6. – P. 122-125.
43. **Reike D., Vermeulen Walter J.V.** (2018). The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? // Resources, Conservation and Recycling. P. 246-264.
44. **Shevchenko T. I., Shuptar-Porivayeva N. Y., Gubanova O. R. and others.** (2022). Циркулярна економіка [Circular economy]. Sumy: University book. – 220 p. (in Ukrainian).
45. **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, 32:7,588-597, doi: [10.1080/02827581.2017.1342859](https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1342859).
46. **Titus, B.D., Brown, K., Helmisaari, HS. et al.** (2021). Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines. Energ S So 11, 10. doi: <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00281-w>.
47. **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>.
48. **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>.
49. **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>
50. **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>
51. **Гайда С.В.** Визначення характеристик столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез МН-ПК (05-06.06.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 118-120. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17079555>
52. **Гайда С.В.** Встановлення показника циркулярності в лісовому секторі: матеріали тез XIV МН-ПК (23–24 травня 2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.2. – С. 192-194.
53. **Гайда С.В.** Основи створення гнучких виробничих систем. Гнучкі автоматизовані виробництва та робототехніка в деревообробці: Ч.1. – Львів: ЦНТЕІ, 1998. – 149 с.
54. **Гайда С.В.** Реалізація принципів циркулярної економіки в лісовому секторі: матеріали тез Н-ПК (24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 110-112. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
55. **Гайда С.В.** Технології вживаної деревини як дієві механізми для реалізації принципів циркулярної економіки: матеріали тез Н-ПК (05-06.06.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 137-139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17079555>
56. **Гайда С.В., Гузь М.М., Никитюк Л.О.** Корневая древесина-источник дополнительного сырья для плитного производства. Тези НТК (21-25.09.92). Архангельск:ЦНИИМОД. – С.88-89.
57. **Гайда С.В., Кшивецький Б.Я.** Оперативно-виробниче планування гнучких виробничих систем // Метод. вказівки. – Львів : ЦНТЕІ, 2000. – 29 с.
58. **Гайда С.В., Кшивецький Б.Я.** Проектування гнучких виробничих систем: Метод. вказівки. – Львів : ЦНТЕІ, 1998. – 34 с.
59. **Гайда С.В., Лесів Л.Е.** Міцність комбінованих столярних плит із вживаної деревини ялиці: матеріали тез Н-ПК (24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 128-130. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>

60. **Гайда С.В., Лесів Л.Е.** Побудова моделі міцності зрощених заготовок із вживаної деревини ялиці: матеріали тез Н-ПК (м. Харків, 7-8 жовтня 2024 р.). – Харків : ДБТУ, 2024. – С. 187-189. <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/conf-07-08-10-24-mater.pdf>
61. **Гайда С.В., Лесів Л.Е.** Порівняльний аналіз комбінованих столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез XIV МН-ПК (23–24 травня 2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 215-217.
62. **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 доповідей всеукраїнської НПК (м. Харків, 24-25 квітня 2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 131-133. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
63. **Гайда С.В., Медвідь Л.В.** Дослідження міцності при статичному згині столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез Н-ПК (м. Харків, 7-8 жовтня 2024 р.). – Харків : ДБТУ, 2024. – С. 193-195. <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/conf-07-08-10-24-mater.pdf>
64. **Гайда С.В., Медвідь Л.В.** Міцність звичайних столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез XIV МН-ПК (23–24 травня 2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 213-214.
65. **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>
66. **Гайда С.В., Медвідь Л.В.** Технологія поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом: матеріали тез Н-ПК (24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 134-136. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
67. **Гайда С.В., Подібка Т.І.** Вплив товщини рейок на формостійкість меблевих щитів: Матеріали тез XV МН-ПК (22–23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.1. – С. 184-186. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
68. **Гайда С.В., Подібка Т.І.** Забезпечення площинності меблевих щитів із бука європейського: матеріали тез Н-ПК (24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 137-139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
69. **Гайда С.В., Подібка Т.І.** Формостійкість меблевих щитів із сосни звичайної: матеріали тез XIV МН-ПК (23–24 травня 2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 211-212.
70. **Гайда С.В., Удовиський 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/>
71. **Гайда, С.В.** Перспективи роботизації меблевої промисловості України. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2003. – Вип. 11 – С. 36-37.
72. **Гайда, С.В.** Прогресивні плитні матеріали MDF та OSB. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 1 – С. 30-32.
73. **Гайда, С.В.** Що нам важко стілець зробити? Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 3 – С. 44-52.
74. **Грицак С.С., Грицак С.А., Гайда С.В.** Встановлення залежності довжини бездефектної дуги деревини ясеня 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/>
75. **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>
76. **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/>
77. **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>
78. **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/>
79. **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>

80. 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/>
81. 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>
82. Смаль В.І. Публічний звіт голови державного агентства лісових ресурсів України за 2024 рік, 65 с. <https://www.openforest.org.ua/wp-content/uploads/2025/02/zvit-holovy-derzhavnoho-ahentstva-lisovykh-resursiv-ukrainy-za-2024-rik.pdf>
83. Удовицький О.М., Гайда С.В. Салабай Р.Г. Некондиційна деревина у бетонних виробках: Матеріали тез XV МН-ПК (22–23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.2. – С. 141-142. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>

UDC 674.001

Prof. S.V. Gayda, Doktor of Sciences – UNFU

Dynamics of the wood harvesting industry in the context of the circular economy

The problems of the forest industry complex in the context of a circular economy are substantiated, which can be described by the following points: loss of resources at the logging site, residues in processing processes, environmental pollution, inappropriate logging, which can lead to loss of biodiversity, market instability. The dynamics of the area of the forest fund of Ukraine in thousand hectares for the forty-two-year period from 1983 to 2025 are described, which, according to the State Agency of Forest Resources of Ukraine, is 10.4 million hectares. The dynamics of changes in wood reserves in the forests of Ukraine, million m³ for the thirty-seven-year period from 1988 to 2025, which as of 2025 is 2.3 billion m³, are presented. The dynamics of the area of forest regeneration in Ukraine, hectares for the eight-year period from 2019 to 2024 is described, which as of 2025 is 35.2 thousand hectares. The dynamics of wood harvesting in Ukraine, thousand m³ for the six-year period from 2019 to 2025 with growth and decline indices: 2019/2020 – 85.42%; 2020/2021 – 99.01%; 2021/2022 – 90.28%; 2022/2023 – 98.49%; 2023/2024 – 94.98% are analyzed. The dynamics of harvesting by tree species in Ukraine, thousand m³ are determined. m³, the analysis of which shows that coniferous timber accounts for 55.0-68.0%, and hardwoods are much less - in the range of 25.0-33.0% of all harvested wood. It was established that with wood harvesting in 2024 in the amount of 14905.8 thousand m³, as the lowest indicator for the analyzed period, the analysis of the dynamics of wood harvesting indicators in the context of a circular economy required the study of several key aspects, in particular the sustainability of wood harvesting of liquid wood and the processing of wood residues from all processes. Comprehensive ways of solving the problems of the forest industry complex are described and proposed, which include: creating a closed cycle of resource use; development of processing technologies, introduction of energy-efficient technologies for wood production and processing; continued implementation of forest use within the framework of sustainable development; stimulating the use of secondary raw materials; implementing circular business models; solving problems related to the involvement of used wood in production processes.

Keywords: forest, wood, timber industry, forest fund, wood stock, forest regeneration, wood industry production, wood products, dynamics of indicators, circular economy, used wood.



*Доц. Р.Я. Оріховський¹, к.т.н.; проф. С.В. Гайда², д-р техн. наук;
доц. С.А. Грицак³ канд. техн. наук; ст. викл. Л.В. Салапак⁴ – НЛТУ України*

ВИБІР ПОСЛІДОВНОСТІ ПРОДУКТИВНОСТЕЙ ВЕРСТАТІВ В АВТОМАТИЗОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМАХ ДЕРЕВООБРОБНОГО ВИРОБНИЦТВА

Розроблена методика вибору послідовності продуктивностей верстатів в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва. Методику доцільно використовувати для компонування автоматизованих ліній з оптимальною продуктивністю і ефективністю функціонування. Проведено аналізування технологічних операцій деревообробки та ефективність функціонування автоматизованих ліній. Встановлено, що причиною низької ефективності роботи автоматизованих ліній на підприємствах деревообробної галузі є низька стабільність технологічних операцій, а також неправильний вибір послідовності продуктивностей верстатів. Оброблювання деревини підлягає впливу стохастичного характеру. Розмірно-якісні характеристики сировини, стан технологічного устаткування, організація технологічного процесу мають значний вплив на продуктивність автоматичних ліній. Запропонована методика застосує імітаційне моделювання для дослідження структури автоматизованих ліній і підвищення їх продуктивності. Встановлено, що автоматизовані лінії з високо стабільним устаткуванням мають значно вищу ефективність і продуктивність виробництва.

Ключові слова: автоматизовані лінії деревообробного виробництва; деревообробні верстати; компонування автоматизованих ліній; параметр стабільності технологічних операцій; продуктивність автоматизованих ліній.

Вступ. Дослідження впливу стабільності технологічних операцій на ефективність функціонування автоматизованих виробничих систем деревообробного виробництва є важливим завданням дослідників технологічних процесів.

Проблемні аспекти дослідження:

- Різні типи деревини (особливо вторинна сировина – вживана деревина) мають неоднорідні властивості, через що продуктивність кожного верстата змінюється залежно від попередньої операції. Традиційні лінійні алгоритми планування не враховують варіативність характеристик перероблюваного матеріалу, що призводить до простоїв або перевантажень обладнання.
- Сучасні автоматизовані лінії часто спроектовані для великовантажного виробництва однакових деталей, тоді як переробка вживаної деревини вимагає швидкої переналагоджуваності [53, 57, 58, 62, 78, 81, 85-96,].
- Відсутність модульних рішень ускладнює інтеграцію нових верстатів або зміну їх порядку без масштабних простоїв. Поточні схеми переробки деревини часто не забезпечують повного

¹ Оріховський Роман Ярославович, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: +38-067-278-13-68. E-mail: romanorix9@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4136-4058>

² Гайда Сергій Володимирович – академік Лісівничої академії наук України, доктор технічних наук, професор кафедри технологій меблів та виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-238-45-04, +38-067-791-25-22. E-mail: serhiy.hayda@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7468-5661> ResearcherID: ABB-1636-2021 Scopus/authorID=57221587964

³ Грицак Степан Андрійович – канд. техн. наук, доцент, кафедра технології меблів і виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-258-31-75, +38-097-904-20-70. E-mail: stepan.hrytsak@nltu.edu.ua

⁴ Салапак Любов Василівна – старший викладач, кафедра прикладної механіки і технології матеріалів. Тел.: +38-098-432-16-06. E-mail: yubov.salapak@nltu.edu.ua

замкненого циклу, через що значна частина вторинної сировини вилучається з виробничого потоку [1, 7, 23, 24, 45, 56, 70, 76, 83].

- Неефективне планування послідовності операцій призводить до підвищеної витрати електроенергії, пального та інструментального ресурсу [1, 2, 53, 57, 58, 62, 78, 81, 85-96,].
- Відсутність урахування залишкових властивостей матеріалу після кожної обробки може збільшувати обсяг відходів [4, 38, 47].
- Недостатній контроль за екологічною безпекою технологічних процесів меблевого та деревообробного виробництва сприяє забрудненню повітря, підвищенню викидів CO₂, а також інші проблеми [17, 22, 26, 28, 33, 56, 59, 60, 71, 73].

Актуальність дослідження:

- З розвитком циркулярної економіки [1, 2, 9, 19, 27, 38, 40, 41, 73, 52, 54] в ЄС і Україні зростає потреба у впровадженні технологій, що максимально використовують відновлювані ресурси й знижують залежність від лісозаготівель [3, 5, 10, 14, 17, 20, 23, 26, 27, 31, 34, 35, 46, 53, 57, 58, 62, 66, 71, 81]. Результати дослідження можуть бути апробовані як у великих промислових цехах, так і в модульних мобільних майстернях, що відкриває нові можливості для малих та середніх підприємств для виробництва різних матеріалів для меблевого виробництва, про що свідчать статистичні показники [17, 28, 32, 82].
- Оптимізація послідовності верстатів дозволить зменшити втрати та забезпечити стабільну якість кінцевого продукту з відходів деревини [4, 25, 34, 38, 47].
- В умовах частих змін ринку меблів та будівельних матеріалів виникає необхідність швидкої перебудови ліній під нові види продукції [8, 11, 12, 13, 16, 21, 36, 39, 51, 59, 60, 63, 67, 68, 69, 72, 74, 80].
- Розробка адаптивних алгоритмів планування забезпечить конкурентоспроможність виробництва та скорочення часу переналагодження.
- Раціональна послідовність верстатів сприятиме зменшенню енергоспоживання та подовженню строків служби інструментів. Екологічно безпечні методи обробки й максимально можливе використання вживаної деревини [6, 17, 20, 22, 26, 28, 30, 33, 56, 59, 60, 71, 73, 77] знижують вплив на довкілля та сприяють «зеленому» іміджу компаній.
- Запропоновані підходи сприятимуть прискоренню науково-технічного прогресу в галузі та інтеграції принципів Industry 4.0 у деревообробне виробництво. Детальний аналіз стану питання в деревообробному виробництві дає можливість зрозуміти вузькі місця [15, 17, 18, 19, 29, 42, 48, 49, 50, 61, 75, 78, 79].

Постановка завдання даного дослідження полягає у тому, що важливо з метою підвищення ефективності автоматизованих ліній деревообробки здійснити аналіз процесів функціонування обладнання. Важливо визначити можливі методи підвищення продуктивності автоматизованих ліній. Такі завдання досліджували англійські та американські науковці [97-102]. Науковці праці дослідників були присвячені вивченню виробничих процесів у машинобудуванні. Дослідження автоматизованих ліній деревообробної галузі здійснювали дослідники тривалий час [1, 2, 81, 85-96]. Пропонували різні шляхи збільшення продуктивності автоматизованих ліній. Найчастіше застосовували імітаційне моделювання для досліджування роботи автоматизованої лінії. Наші дослідження присвячені дослідженню автоматизованих ліній деревообробного виробництва, які мають свої особливості. Дослідження автоматизованих ліній деревообробних виробництв з метою підвищення ефективності функціонування та продуктивності є актуальними на теперішній час. Попередні дослідження [2] деревообробного виробництва не ураховували усі показники роботи верстатів. Важливо під час експлуатації обладнання забезпечувати високу продуктивність роботи використовуючи різні методи.

У науковій праці [98] розглядається інноваційна стратегія технічного обслуговування виробничої системи. Технологічна лінія включає несправний верстат і

має буферний запас для компенсації випадкових впливів. Із збільшенням кількості виконаних технологічних операцій стан верстата погіршується, тому зростає виробничий брак. Стохастичний процес збільшує кількість відмов у процесі роботи лінії. Для відновлення роботи верстата приймають рішення та здійснюють ремонт. Пропонується застосовувати гібридний метод оптимізації порядку обслуговування системи виробництва. Гібридний метод враховує застосування модифікованого методу прийняття рішень людиною. Застосовується імітаційне моделювання, метод Монте-Карло та застосовуються генетичні алгоритми (GA) для розв'язування завдань. Оператор лінії приймає рішення, вибирає необхідні заходи з технічного обслуговування, ураховує біжучу інформацію про стан виробничої системи. На основі математичної моделі, застосовуючи імітаційне моделювання Монте-Карло та GA, здійснюють корекцію параметрів оптимізації автоматизованої лінії. У науковій праці [97] проведено дослідження виробничої системи для обробляння неперервного потоку заготовок з двома верстатами, які підлягають профілактичному технічному обслуговуванню залежно від стану і мають проміжний буфер заданої місткості.

Аналізування наукових досліджень [2, 84, 102] дозволило визначити, що однією з причин малої ефективності функціонування автоматизованих систем є невисокі значення параметрів стабільності технологічних операцій. Ця особливість є характерною для процесів обробляння деревини і деревинних матеріалів.

Об'єкт дослідження – автоматизовані лінії деревообробного виробництва.

Предмет дослідження – методи вибору послідовності продуктивностей верстатів в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва, ефективність функціонування.

Мета роботи – оцінювання продуктивності обладнання та автоматизованих ліній, забезпечення високої продуктивності роботи деревообробних автоматизованих ліній. Для досягнення мети визначено такі **завдання дослідження**:

- здійснити аналіз наукових досліджень за даним напрямом;
- проаналізувати шляхи підвищення продуктивностей автоматизованих ліній деревооброблювального виробництва.

Аналіз наукових досліджень та наукових праць. Сучасні методи аналізування та оцінювання важливості впливу стабільності технологічних операцій на ефективність функціонування автоматизованих ліній є недосконалими. Наприклад, може використовуватися усереднене значення параметра стабільності для всіх верстатів автоматизованої лінії [2]. Методи розрахунку усереднених показників стабільності верстатів [93] розраховуються залежно від компонування технологічного обладнання в автоматизовану лінію. Розглядаються різні варіанти компонування верстатів в автоматизовану лінію: послідовне, паралельне або змішане компонування верстатів залежно від технологічного процесу оброблювання [8]. Для здійснення розрахунків коефіцієнтів використання робочого часу устаткування у двоверстатних лініях з жорсткими зв'язками проводилося імітаційне моделювання, сформульовані основні висновки і рекомендації з метою підвищення продуктивності автоматизованих ліній [2]. У наукових працях [86-92, 95] здійснено аналіз математичного апарату для моделювання процесів функціонування двоверстатної автоматизованої лінії з гнучкими зв'язками. Обчислені коефіцієнти використання робочого часу і продуктивності ліній. Запропоновано впорядкування

послідовності [94, 96] розміщування верстатів з різною продуктивністю для структур триверстатних автоматизованих ліній із стохастичними характеристиками. Встановлено ступені впливів параметрів Ерланга технологічних операцій на продуктивність автоматизованої лінії.

Розроблені рекомендації щодо компонування верстатів в автоматизовані лінії з урахуванням раціональної послідовності стабільностей верстатів. Науковці досліджують проблеми формалізації показників ефективності функціонування автоматизованих ліній з жорстким компонуванням устаткування [96]. За кордоном виконуються дослідження розроблення оптимальних структур компонування обладнання в автоматизовані лінії застосовуючи штучний інтелект [98]. Проаналізовано основні функції і структури гнучких автоматизованих виробничих систем. Підтверджено основні принципи формування систем автоматизованого контролю і керування технологічними процесами та гнучким автоматизованим виробництвом [96]. Вирішення проблем моделювання процесів роботи автоматизованих ліній здійснюють науковці Массачусетського технологічного інституту (англ. *Massachusetts Institute of Technology*) у США [99, 100].

Результати досліджень та їх обговорення. На підставі проведеного моніторингу і експериментальних пошуків проектування і застосування автоматичних ліній, гнучких автоматизованих виробництв сформувавши такі правила розрахунків та підбирання величин номінальних продуктивностей деревооброблювальних верстатів у послідовних технологічних лініях:

- найбільшу продуктивність має перший верстат в автоматичній лінії. Продуктивність наступних верстатів зменшується до кінця автоматичної лінії. Останній верстат в автоматичній лінії має найменшу продуктивність;
- всі верстати в автоматичній лінії мають однакову продуктивність;
- найбільшу продуктивність має останній верстат в автоматичній лінії. Продуктивність верстатів перед ним зменшується. Перший верстат в автоматичній лінії має найменшу продуктивність;
- в центрі автоматичної лінії зосереджені верстати з найбільшими величинами номінальних продуктивностей. З обох боків розміщені верстати з меншими продуктивностями. Найменш продуктивні верстати розміщуються у кінці і на початку автоматичної лінії.
- номінальна продуктивність кожного з верстатів вибрано відповідно з економічними витратами на кожній з технологічних операцій за критерієм номінальної величини сумарних економічних витрат. Але послідовність величин цих продуктивностей не впорядкована за жодним з цих правил.

Варіанти компонування автоматизованих ліній з послідовним агрегуванням верстатів з однаковою продуктивністю на практиці зустрічаються дуже рідко через дві причини. По-перше, такі автоматизовані лінії доцільно використовувати тільки для випадку рівномірного розподілу економічних витрат на виготовлення продукції. Така умова майже не здійснюється. По-друге, одне і теж технологічне устаткування в гнучких виробничих системах використовується для оброблення різних заготовок. Для різних видів продукції, устаткування працює з різною номінальною продуктивністю.

Для дослідження ефективності різних типів послідовних виробничих систем і правил упорядкування послідовностей продуктивностей верстатів у них, проводиться імітаційне моделювання процесів функціонування різноманітних варіантів ліній і технологічних потоків. У комп'ютерному експерименті цікавлять такі основні фактори: кількість верстатів або ліній, їхні номінальні продуктивності, спо-

сіб упорядкування послідовності верстатів в автоматизованій лінії. Ефективність автоматизованих ліній оцінюємо за допомогою економічного критерію та фактичною продуктивністю автоматизованої лінії в цілому.

У межах стабільності кількості верстатів в автоматизованій лінії та їх номінальних продуктивностей критерій найбільшої фактичної продуктивності буде задовільняти вимоги критерія найменших питомих витрат. Це пояснюється тим, що усі параметри технологічного устаткування залишаються тими ж самими, а змінюється тільки послідовність розміщування верстатів у автоматизованих лініях [1]. Тому найбільша продуктивність автоматизованої лінії буде забезпечувати найменше значення економічних витрат на одиницю продукції.

Середні величини досліджуваних показників ми розраховували за даними таблиці 1. Виконували 10 тисяч реалізацій моделюючого алгоритму в одному комп'ютерному експерименті. Кількість експериментів вибиралася у межах 7-10. У результаті обчислень отримали достатньо стабільні величини критеріїв оцінювання ефективності автоматизованої лінії. Фрагмент отриманих даних для лінії з 3-х верстатів подається в табл.1.

Таблиця 1. Відносна продуктивність лінії

NN зп	Фактична продуктивність лінії у зворотній послідовності	Послідовність номінальних продуктивностей верстатів	Фактична продуктивність лінії у прямій послідовності
1	0.743	1.5 – 1.0 – 2.0	0.742
2	0.751	1.0 – 1.5 – 2.0	0.750
3	0.768	1.0 – 2.0 – 1.5	0.766

З три верстатів за різними варіантами послідовностей компонування можна сформулювати $3!$ варіантів автоматичних ліній. З цих шести варіантів найменшу продуктивність мають варіанти, у яких найменш продуктивний верстат розміщується у центрі лінії (варіанти I і II – пряма і зворотна послідовності). У розрахунках номінальні продуктивності верстатів (1.0, 1.5 і 2.0) і фактична продуктивність автоматизованої лінії Π_n подаються у відносних одиницях. Найменша продуктивність верстата у лінії для зручності аналізування у всіх варіантах приймається за одиницю. Найбільше значення накладання втрат робочого часу створюють верстати у лінії, які мають найдовшу тривалість технологічних операцій та найнижчу стабільність і таким чином найменшу номінальну продуктивність. У перших двох варіантах такий верстат розміщується у центрі автоматизованої лінії. Він спричинює створення підвищених накладених втрат робочого часу на обидва суміжні верстати у автоматизованій лінії. Тому фактична продуктивність автоматизованої лінії в даному процесі є найнижча серед усіх шести варіантів. У двох наступних варіантах компонування лінії (III, IV) найменш продуктивний верстат взаємодіє тільки з одним попереднім (варіант III) або наступним (варіант IV) верстатами (табл. 2). З протилежної сторони він не має ніяких обмежень для своєї роботи. Тому такі варіанти компонування ліній мають більш високу продуктивність.

Варіанти автоматичної лінії, що в їх центрі знаходиться найбільш продуктивний верстат, мають таку особливість, менш продуктивні верстати знаходяться на краях автоматичної лінії і мають у зв'язку з тим тільки одностороннє обмеження. Це зумовлює найвищу продуктивність двох останніх варіантів автоматичної лінії.

Об'єднання в автоматичні лінії чотирьох верстатів дає можливість проаналізувати 24 різних варіантів автоматичних ліній (табл. 2). Найбільш вузькими місцями цих варіантів будуть найменш продуктивні верстати і особливо в тому випадку, коли вони обидва разом знаходяться в центрі лінії (чотири варіанти).

Вищу продуктивність мають варіанти компоновання автоматичних ліній, в яких найменш продуктивний верстат розташований на краю лінії – на її початку або в кінці (варіанти 4 в табл. 2). Ще вищу фактичну продуктивність забезпечує компоновання автоматичних ліній, у яких верстати з найбільшою продуктивністю розташовуються ближче до центру автоматичної лінії. Такий варіант побудований за алгоритмом японських вчених К. Окамура і Г. Ямашина. Згідно з цим алгоритмом верстат з найменшою величиною номінальної продуктивності (1.0) розташований у кінці лінії. Наступний за величиною номінальної продуктивності (1.25) верстат поставлений на початку лінії. Третій за продуктивністю верстат розташовується перед першим (найменш продуктивним). І, нарешті четвертий, останній у даній лінії – після другого.

Таблиця 2. Продуктивність лінії з чотирьох верстатів

NN зп	Фактична продуктивність лінії у зворотній послідовності	Послідовність номінальних продуктивностей верстатів у лініях	Фактична продуктивність лінії у прямій послідовності
1	0.654	2.0-1.25-1.0-1.5	0.654
2	0.657	2.0-1.0-1.25-1.5	0.656
3	0.655	2.0-1.5-1.0-1.25	0.658
4	0.659	2.0-1.5-1.25-1.0	0.662
5	0.667	2.0-1.0-1.5-1.25	0.664
6	0.667	2.0-1.25-1.5-1.0	0.668
7	0.671	1.5-2.0-1.0-1.25	0.667
8	0.670	1.5-1.0-2.0-1.25	0.674
9	0.676	1.5-2.0-1.25-1.0	0.675
10	0.682	1.5-1.25-2.0-1.0	0.686
11	0.682	1.25-2.0-1.5-1.0	0.688
12	0.692	1.25-1.5-2.0-1.0	0.690

У даному комп'ютерному експерименті, як і в попередньому, цілком виразно проявляється закономірність зростання фактичної продуктивності автоматичних ліній з впорядкуванням послідовності верстатів за їх продуктивністю. Кожний варіант послідовностей продуктивностей у автоматичній лінії випробовувався як в прямій послідовності (зліва-направо в таблицях 1 і 2), так і в зворотній (справа-наліво в табл. 1 і 2). Всередині кожної такої пари різниця фактичних продуктивностей автоматичної лінії незначна, і робити висновок про переваги однієї з послідовностей нема підстав.

Продовжимо аналізування результатів дослідження автоматичних ліній з п'яти, шести, одинадцяти верстатів. Тут кількість можливих варіантів компоновання досягає великих величин – 5!, 6!. Тому розглядаємо тільки найбільш характерні з них, щоб з'ясувати загальні закономірності і тенденції. Серед них найменш продуктивні варіанти автоматичних ліній (табл.3.), впорядковані за виділеними алгоритмами (табл. 3 в4), а найпродуктивніші варіанти (табл. 3, в12). Розглянемо їх детальніше. Як у попередніх компонованнях, найнижчу продуктивність

мають автоматичні лінії, в яких верстати з найменшою продуктивністю знаходяться в центрі лінії (табл.3, в1). Значний ефект підвищення фактичної продуктивності автоматичної лінії отримуємо за рахунок первинного упорядкування послідовності верстатів за їх номінальними продуктивностями (табл. 3, в2). Впорядкований за алгоритмом К. Окамури, Г. Ямашини варіант компонування лінії займає проміжне значення за продуктивністю автоматичної лінії (табл. 3, в7).

Таблиця 3. Продуктивність лінії з п'яти верстатів

NN зп	Фактична продуктивність лінії у зворотній послідовності	Послідовність номінальних продуктивностей верстатів у лініях	Фактична продуктивність лінії у прямій послідовності
1	0.637	2.0-1.5-1.0-1.25-1.75	0.637
2	0.649	2.0-1.75-1.5-1.25-1.0	0.650
3	0.660	2.0-1.5-1.25-1.75-1.0	0.661
4	0.667	1.75-1.5-1.25-2.0-1.0	0.667
5	0.670	1.5-1.25-2.0-1.75-1.0	0.673
6	0.675	1.5-1.25-1.75-2.0-1.0	0.677
7	0.679	1.25-1.75-2.0-1.5-1.0	0.682
8	0.682	1.25-2.0-1.75-1.5-1.0	0.680
9	0.683	1.25-2.0-1.5-1.75-1.0	0.683
10	0.685	1.25-1.5-1.75-2.0-1.0	0.685
11	0.686	1.25-1.5-2.0-1.75-1.0	0.686
12	0.687	1.25-1.75-1.5-2.0-1.0	0.687

Впорядкування послідовності номінальних продуктивностей верстатів у автоматичних лініях з п'яти-шести верстатів (табл. 3 і табл. 4) дає змогу підвищити їх фактичну продуктивність у межах 8-12%. А це у два рази більше, ніж для коротких автоматичних ліній з кількістю верстатів у них до чотирьох.

Найбільше зниження фактичної продуктивності автоматичної лінії спостерігається тоді, коли верстати з малою продуктивністю концентрують разом, в одному місці (перших 3-4 варіанти ліній у табл. 4), особливо в центрі автоматичної лінії.

Таблиця 4. Фактична продуктивність лінії з шести верстатів

NN зп	Фактична продуктивність лінії у зворотній послідовності	Послідовність номінальних продуктивностей верстатів у лініях	Фактична продуктивність лінії у прямій послідовності
1	0.551	1.5-1.3-1.1-1-1.2-1.4	0.552
2	0.554	1.5-1.1-1.3-1-1.2-1.4	0.553
3	0.556	1.5-1.1-1.3-1.2-1-1.4	0.557
4	0.559	1.5-1.4-1.3-1.2-1.1-1	0.560
5	0.579	1.1-1.3-1.4-1.2-1.5-1	0.575
6	0.576	1.1-1.3-1.5-1.4-1.2-1	0.577
7	0.576	1.1-1.5-1.3-1.2-1.4-1	0.577
8	0.577	1.1-1.3-1.5-1.2-1.4-1	0.578
9	0.578	1.1-1.5-1.3-1.4-1.2-1	0.578
10	0.579	1.1-1.4-1.3-1.2-1.5-1	0.579

Розведення таких верстатів на краї автоматичної лінії значно підвищує фактичну продуктивність лінії в цілому. Такі закономірності змінювання фактичної продуктивності автоматичної лінії більш чітко прослідковуються у довгих авто-

матичних лініях. Наприклад, в автоматичній лінії, що складається з одинадцяти послідовних верстатів (табл. 5).

Перші два варіанти автоматичної лінії мають найнижчу пропускну спроможність, як і в попередніх варіантах ліній, тому що декілька верстатів малої продуктивності зосереджуються в центрі (табл.5, в1) або в кінці лінії (табл. 5, в2).

У автоматичній лінії, що впорядкована за алгоритмом К. Окамури, Г. Ямашини (табл.5, в5), таке зосередження малопродуктивних верстатів спостерігається на обох кінцях автоматичної лінії, тому цей алгоритм не може вважатися базовим і перспективним для впорядкування послідовностей верстатів у лініях.

Таблиця 5. Фактична відносна продуктивність лінії з одинадцяти верстатів

NN зп	Фактична продуктивність лінії у зворотній послідовності	Послідовність номінальних продуктивностей верстатів у лініях	Фактична продуктивність лінії у прямій послідовності
1	0.540	1.9-1.7-1.5-1.3-1.1-1-1.2-1.4-1.6-1.8-2	0.539
2	0.556	2-1.9-1.8-1.7-1.6-1.5-1.4-1.3-1.2-1.1-1	0.557
3	0.568	1.7-1.5-1.3-1.1-1.9-1-2-1.2-1.4-1.6-1.8	0.570
4	0.594	1.5-1.6-1.4-1.7-1.3-1.8-1.2-1.9-1.1-2-1	0.594
5	0.596	1.1-1.3-1.5-1.7-1.9-2-1.8-1.6-1.4-1.2-1	0.597
6	0.601	1.1-1.9-1.5-1.7-1.3-2-1.2-1.6-1.4-1.8-1	0.602
7	0.603	1.1-1.9-1.3-1.5-1.7-2-1.6-1.4-1.2-1.8-1	0.603
8	0.604	1.1-1.9-1.7-1.3-1.6-1.4-1.5-1.8-1.2-2-1	0.606
9	0.605	1.1-1.9-1.5-1.8-1.2-1.6-1.4-1.7-1.3-2-1	0.605
10	0.606	1.1-1.9-1.3-1.7-1.5-1.6-1.4-1.8-1.2-2-1	0.608

Щоб вирахувати найбільш перспективні варіанти компонування автоматичних ліній, характерні риси цих варіантів та встановити закономірності їх формування, розглянемо подані вище типи автоматичних ліній детальніше. Виділимо з кожної групи автоматичних ліній лише по чотири варіанти, а саме, варіанти з найменшою продуктивністю, упорядковані за зменшенням (чи збільшенням) номінальних продуктивностей верстатів, які упорядковані за алгоритмом К.Окамури і Г.Ямашини, з попарним групуванням малопродуктивних і високопродуктивних верстатів (це варіанти з найбільшою продуктивністю).

Таблиця 6. Фактична відносна продуктивність автоматичних ліній для різних правил упорядкування послідовностей продуктивностей верстатів

NN зп	Правила впорядкування продуктивностей	Кількість верстатів та межі їх продуктивностей						
		3 1-2	4 1-2	5 1-2	6 1-2	6 1-1.5	8 1-2	11 1-2
1	Централізація малих продуктивностей 	0.742	0.654	0.637	0.607	0.551	0.587	0.539
2	Спадання величин продуктивностей 	0.750	0.660	0.650	0.622	0.560	0.601	0.556
3	Централізація великих продуктивностей 	0.767	0.688	0.680	0.659	0.576	0.635	0.596
4	Попарне групування 	—	0.691	0.683	0.661	0.577	0.638	0.601
5	Впорядкування парами 	—	0.691	0.687	0.663	0.579	0.641	0.607

В такому порядку зведемо їх у табл. 6. Алгоритми компоновання автоматичних ліній умовно називаємо так: I варіант – централізація малих продуктивностей; II варіант – спадання продуктивностей верстатів; III варіант – централізація великих продуктивностей; IV варіант – попарне групування продуктивностей; V варіант – впорядкування пар устаткування (або впорядкування парами). Оскільки ймовірність накладання втрат робочого часу у лінії прямопропорційна до тривалості інтервалу випуску та оберненопропорційна до стабільності, тому найбільші втрати часу спостерігаються в автоматичних лініях, у яких допускається найбільша концентрація технологічного устаткування малої продуктивності і низької стабільності (табл.6, в1). Для автоматичних ліній з 5-8 жорстко з'єднаних верстатів значення накладених втрат робочого часу складає 35-40%. У зв'язку з цим такі автоматичні лінії мають найменшу продуктивність.

Впорядкування послідовностей продуктивностей верстатів у автоматичних лініях усіх варіантів однозначно знижує накладені втрати робочого часу і підвищує їх продуктивності. Закономірності змінювання накладених втрат робочого часу і фактичної продуктивності автоматичної лінії для всіх варіантів компоновання автоматичних ліній і для усіх правил впорядкування продуктивностей верстатів у лінії залишаються стабільними. Тому на підставі аналізування спільних особливостей можна сформулювати правило побудови варіантів компоновання автоматичних ліній з найбільшою пропускною здатністю.

У підсумку бачимо (табл. 6), що величини накладених втрат, фактичної продуктивності та їх змінювання однозначно залежать від кількості верстатів у автоматичних лініях та діапазону розсіювання номінальних продуктивностей верстатів. Варіанти автоматичної лінії, які зкомпоновані з шести верстатів відрізняються між собою верхньою межею номінальної продуктивності. Для варіанта 6 ряд продуктивностей: 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, а для варіанта 6' (табл.6) – 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5. Варіант 6 з трьома верстатами більш високої продуктивності (1.6, 1.8, і 2.0), ніж варіант 6'. Ефективність впорядкування продуктивностей з більшим діапазоном їх розсіювання теж буде вища.

Зі збільшенням кількості упорядкованих верстатів **а** в автоматичній лінії дуже швидко зростає ефективність упорядкування. Збільшення кількості верстатів від 3-4-х до 5-6-ти подвоює зростання продуктивності автоматичної лінії. Збільшення кількості верстатів у лінії до 11-12-ти – потроєє зростання.

З чотирьох виділених правил розміщування номінальних продуктивностей верстатів у автоматичних лініях, ефективною виділяється три останніх правила. Важливим є централізація великих продуктивностей. Верстати з найменшою продуктивністю розподіляються на краї автоматичної лінії. Попарне групування верстатів передбачає, що кожний верстат з малою продуктивністю komponується поруч з верстатом із великої продуктивності. Упорядкування верстатів парами, ураховує, що кожна з пар розміщується таким чином, щоб розподілити малопродуктивні верстати.

Перше з указаних **правил** (алгоритм К. Окамури, Г. Ямащини) створює добрі результати для автоматичних ліній з 3-4-х верстатів. Для три верстатів таке правило дає найкращий варіант. Для автоматичних ліній з чотирьох верстатів трохи кращий варіант можна отримувати шляхом попарного групування (табл.6). Для автоматичних ліній з п'яти верстатів таких варіантів уже може бути кілька.

Згідно першого алгоритму упорядкування малі продуктивності верстатів тільки розносять на краї автоматичної лінії. Вони зосереджуються там і утворюють два «вузькі місця»: на початку і в кінці автоматичної лінії. Тому цей алгоритм упорядкування забезпечує оптимізацію послідовностей продуктивностей верстатів тільки в коротких автоматичних лініях (з три верстатів).

Друге правило передбачає групування продуктивностей верстатів по два верстати у кожному парі. Перша пара продуктивностей верстатів утворюється з найбільшої та найменшої величин. Друга пара формується, відповідно, з другої та передостанньої величин продуктивностей і т.д. Таке «парування» не дозволяє безпосередньо стикуватися малопродуктивному устаткуванню (табл. 5). Наявність біля кожної малої величини продуктивності великої значно обмежує наростання накладених втрат робочого часу. В тому полягає перевага правил попарного групування.

Третє правило враховує переваги двох попередніх правил. Отримані за попереднім правилом пари продуктивностей верстатів ще упорядковуються. Ці заходи забезпечують рознесення малих продуктивностей верстатів на краї автоматичної лінії і рівночасно розділяють їх верстатами з великими продуктивностями. Тому скомпоновані таким чином варіанти ліній забезпечують найбільшу пропускну здатність.

Алгоритм упорядкування автоматичних ліній парами верстатів складається з кроків:

1. N кількість верстатів, з яких компонується автоматична лінія чи гнучка виробнича система, номерують за порядком зростання величини їх номінальних продуктивностей. Першими у ряді будуть найменш продуктивні верстати. Найпродуктивніший верстат матиме номер n .

2. Перша пара продуктивностей верстатів формується з першого й останнього верстатів: $1, n$; друга пара формується з другого й передостаннього за продуктивністю верстатів: $2, n-1$ і т.д. Таку послідовність пар верстатів записують у вигляді рядів: $1, n; 2, n-1; 3, n-2; \dots; n/2, n/2+1$; – $n/2$ пар для n -парного і $1, n; 2, n-1; 3, n-2; \dots; (n-1)/2, (n+3)/2; (n+1)/2$; – $(n-1)/2$ пар плюс $(n+1)/2$ -ий верстат для n непарного. З отриманих таким чином $n/2$ або $(n+1)/2$ груп компонується автоматична лінія.

3. Перша пара продуктивностей верстатів розміщується на початку автоматичної лінії. Друга пара продуктивностей верстатів розміщується у кінці автоматичної лінії. Третя пара продуктивностей верстатів розміщується після першої пари, четверта пара перед другою парою і т.д. Рівночасно в кожній парі першої половини автоматичної лінії першим ставлять менш продуктивний верстат, а в другій половині автоматичної лінії розміщують більш продуктивний верстат. Таким чином отримуємо повну послідовність всіх пар продуктивностей верстатів для n -парного компонування:

$$1, n; 3, n-2; \dots; \frac{n}{2}-1, \frac{n}{2}+2; \frac{n}{2}, \frac{n}{2}+1; \dots; n-3, 4; n-1, 2 \quad (1)$$

за умови, що кількість пар $n/2$ є парною, і для непарної кількості пар верстатів:

$$1, n; 3, n-2; \dots; \frac{n}{2}-2, \frac{n}{2}+3; \frac{n}{2}, \frac{n}{2}+1; \frac{n}{2}+2, \frac{n}{2}-1; \dots; n-3, 4; n-1, 2. \quad (2)$$

Для непарної кількості верстатів n у лінії маємо таку послідовність продуктивностей верстатів:

$$1, n; 3, n-2; \dots; \frac{n-3}{2}, \frac{n+5}{2}; \frac{n+1}{2}; \frac{n+3}{2}, \frac{n-1}{2}; \dots; n-3, 4; n-1, 2 \quad (3)$$

за умови, що кількість пар верстатів $(n-1)/2$ є парною, і для непарної кількості пар верстатів $(n-1)/2$:

$$1, n; 3, n-2; \dots; \frac{n-1}{2}, \frac{n+3}{2}; \frac{n+1}{2}; \dots; n-3, 4; n-1, 2. \quad (4)$$

Сформульований тут алгоритм упорядкування номінальних продуктивностей послідовних верстатів дає можливість істотно знизити накладені втрати робочого часу і підвищити пропускну здатність автоматичних ліній, гнучких виробничих систем, з послідовних елементів з різною пропускну здатністю.

Запропонована методика розрахунку дозволяє оцінювати вплив на ефективність виробництва усіх складових втрат робочого часу устаткування з метою їх зменшення, для забезпечення високої продуктивності роботи автоматизованих ліній деревообробного виробництва. Методика обчислення урахує оптимальні послідовності продуктивностей верстатів для розрахунку автоматизованих ліній залежно від порядку розташування верстатів у технологічному потоці та кількості верстатів. Методика дає можливість з високою точністю обчислювати реальні процеси функціонування автоматизованих ліній деревооброблювального виробництва. Результати роботи дозволяють сформулювати наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – вперше розроблена методика встановлення послідовностей верстатів автоматизованих ліній деревообробки з різними значеннями продуктивностей та різними стабільностями технологічних операцій. Практична значущість результатів дослідження – результати наукового дослідження доцільно застосувати для визначення параметрів роботи автоматизованих ліній деревообробної галузі із урахуванням особливостей функціонування деревооброблювальних верстатів.

Висновки. Виконані дослідження встановлюють оптимальні послідовності вибору продуктивностей верстатів в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва. Методику доцільно використовувати для компонування автоматизованих ліній з оптимальною продуктивністю і ефективністю функціонування. Стабільність технологічних операцій деревообробного виробництва значно впливає на ефективність функціонування автоматизованих виробничих систем.

1. Пропускна здатність (продуктивність) автоматичних ліній і послідовних виробничих систем значно залежить від послідовності та сукупності співвідношень номінальних продуктивностей сусідніх верстатів у лінії. Найбільші втрати продуктивності у послідовних виробничих системах трапляються там, де зосереджується верстати із малою пропускну здатністю або з низькою стабільністю функціонування. Ефективну компенсацію накладання втрат робочого часу в автоматичній лінії і продуктивності можна реалізувати за допомогою розміщування на краї автоматичної лінії верстатів з малою продуктивністю, установа буферних запасів або високопродуктивного устаткування між такими верстатами.

2. Сформульований алгоритм отримання максимальної продуктивності автоматичних ліній і послідовних виробничих систем за обмежену кількість кроків вирішує завдання оптимального компонування автоматичних ліній. Алгоритм використовується для проектування нових автоматичних ліній і для реконструкції експлуатованих ліній. Він враховує реальні умови функці-

онування. Ефективність упорядкування послідовності продуктивностей верстатів у автоматичній лінії значно зростає зі збільшенням кількості верстатів у лінії та діапазону величин їх номінальних продуктивностей, стабільності роботи.

References

1. **Benny S. Budiman.** (2004). Optimal Capacity Adjustment for Supply Chain Control. Massachusetts Institute of Technology. – 106 p.
2. **Dudyuk D.L., Maksymiv V.M., Orikhovsky R.Ya. et al.** (1996). An imitation design of the flexible automated lines is in a industrial forestry complex: Monograph. – Kyiv: ISDO. – 140 p.
3. **Gayda S.V.** (2007). Research of concentration of operations is in modern furniture Productions. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 33:73-79 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/42073314>
4. **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.
5. **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).
6. **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>
7. **Gayda S.V.** (2013). Основи формування класифікатора вторинних деревинних ресурсів / *Osnovy formuvannya klasyfikatora vtorynnykh derevyynykh resursiv* [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>
8. **Gayda S.V.** (2014). *Teoreticheskoye obosnovaniye podkhoda po prognozirovaniyu prochnosti drevesnostruzhechnykh plit iz vtorychno ispol'zuyemoy drevesiny* [The theoretical rationale for the approach on the prediction the strength of particleboard from recycled wood]. *Actual problems* 38:212-216.
9. **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.
10. **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).
11. **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.
12. **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>
13. **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.
14. **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>
15. **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>.
16. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). *Bulletin of KhNTUA* 197:3-9, (in Ukrainian).
17. **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).

18. **Gayda S.V.** (2023). State and analysis of the dynamics indicators of the production volume of the woodworking and furniture industry. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 4-19 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234901>
19. **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>
20. **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.
21. **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>
22. **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>.
23. **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>.
24. **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>
25. **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>.
26. **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>
27. **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>
28. **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>
29. **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>
30. **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.
31. **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>
32. **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>
33. **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>
34. **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>
35. **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>

36. **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>
37. **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>
38. **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>
39. **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>
40. **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>.
41. **Project «CircHive – Developing & piloting biodiversity footprinting & natural capital accounting via a ‘beehive’ of sectoral hubs, for sustainable transition to a circular EU bioeconomy».** Project Schedule: Start Date 01.12.2022 End Date 30.11.2027.
42. **Ratajczak E.** (2003). *Zasoby odpadów drzewnych w Polsce* / E. Ratajczak, A Szostak. Poznan: Czysta Energia,– Vol. 6. – P. 122-125.
43. **Reike D., Vermeulen Walter J.V.** (2018). The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? // *Resources, Conservation and Recycling*. P. 246-264.
44. **Shevchenko T. I., Shuptar-Porivayeva N. Y., Gubanov O. R. and others.** (2022). Циркулярна економіка [Circular economy]. Sumy: University book. – 220 p. (in Ukrainian).
45. **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*, 32:7,588-597, doi: [10.1080/02827581.2017.1342859](https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1342859).
46. **Titus, B.D., Brown, K., Helmisaari, H.S. et al.** (2021). Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines. *Energ S So* 11, 10. doi: <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00281-w>.
47. **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>.
48. **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>.
49. **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>
50. **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>
84. **Гайда С.В.** Визначення характеристик столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез МН-ПК (05-06.06.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 118-120. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17079555>
51. **Гайда С.В.** Встановлення показника циркулярності в лісовому секторі: матеріали тез XIV МН-ПК (23-24.05.2024 р.). – Чернівці : НУ «ЧП», 2024. – Т.2. – С. 192-194.
52. **Гайда С.В.** Основи створення гнучких виробничих систем. Гнучкі автоматизовані виробництва та робототехніка в деревообробці: Ч.1. – Львів: ЦНТЕІ, 1998. – 149 с.
53. **Гайда С.В.** Реалізація принципів циркулярної економіки в лісовому секторі: матеріали тез Н-ПК (24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 110-112. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>

54. **Гайда С.В.** Технології вживаної деревини як дієві механізми для реалізації принципів циркулярної економіки: матеріали тез Н-ПК (05-06.06.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 137-139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17079555>
55. **Гайда С.В., Гузь М.М., Никитюк Л.О.** Корневая древесина-источник дополнительного сырья для плитного производства. Тези НТК (21-25.09.92). Архангельск:ЦНИИМОД. – С.88-89.
56. **Гайда С.В., Кшивецький Б.Я.** Оперативно-виробниче планування гнучких виробничих систем // Метод. вказівки. – Львів : ЦНТЕІ, 2000. – 29 с.
57. **Гайда С.В., Кшивецький Б.Я.** Проектування гнучких виробничих систем: Метод. вказівки. – Львів : ЦНТЕІ, 1998. – 34 с.
58. **Гайда С.В., Лесів Л.Е.** Міцність комбінованих столярних плит із вживаної деревини ялиці: матеріали тез Н-ПК (24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 128-130. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
59. **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>
60. **Гайда С.В., Лесів Л.Е.** Порівняльний аналіз комбінованих столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез XIV МН-ПК (24-25.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 215-217. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
61. **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>
62. **Гайда С.В., Медвідь Л.В.** Дослідження міцності при статичному згині столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез Н-ПК (7-8.10.2024 р.). – Харків : ДБТУ, 2024. – С. 193-195. <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/conf-07-08-10-24-mater.pdf>
63. **Гайда С.В., Медвідь Л.В.** Міцність звичайних столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез XIV МН-ПК (23–24 травня 2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 213-214.
64. **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>
65. **Гайда С.В., Медвідь Л.В.** Технологія поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом: матеріали тез Н-ПК (24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 134-136. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
66. **Гайда С.В., Подібка Т.І.** Вплив товщини рейок на формостійкість меблевих щитів: Матеріали тез XV МН-ПК (22–23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.1. – С. 184-186. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
67. **Гайда С.В., Подібка Т.І.** Забезпечення площинності меблевих щитів із бука європейського: матеріали тез Н-ПК (24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 137-139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
68. **Гайда С.В., Подібка Т.І.** Формостійкість меблевих щитів із сосни звичайної: матеріали тез XIV МН-ПК (23–24 травня 2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 211-212.
69. **Гайда С.В., Удовиський 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/>
70. **Гайда, С.В.** Перспективи роботизації меблевої промисловості України. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2003. – Вип. 11 – С. 36-37.
71. **Гайда, С.В.** Прогресивні плитні матеріали MDF та OSB. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 1 – С. 30-32.
72. **Гайда, С.В.** Що нам важко стілець зробити? Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 3 – С. 44-52.
73. **Грицак С.С., Грицак С.А., Гайда С.В.** Встановлення залежності довжини бездефектної дуги деревини ясеня 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/>

74. **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>
75. **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/>
76. **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>
77. **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/>
78. **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>
79. **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/>
80. **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>
81. **Смаль В.І.** Публічний звіт голови державного агентства лісових ресурсів України за 2024 рік, 65 с. <https://www.openforest.org.ua/wp-content/uploads/2025/02/zvit-holovy-derzhavnoho-ahentstva-lisovykh-resursiv-ukrainy-za-2024-rik.pdf>
82. **Удовичський О.М., Гайда С.В. Салабай Р.Г.** Некондиційна деревина у бетонних виробках: Матеріали тез XV МН-ПК (22–23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.2. – С. 141-142. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
83. **Mohamed-Chahir Fitouhi, Mustapha Nourelfath, Stanley B. Gershwin.** (2017). Performance evaluation of a two-machine line with a finite buffer and condition-based maintenance. Reliability Engineering & System Safety. 166: 61-72, <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.03.034>
84. **Orikhovskyy R.Ya.** (2019). Research of reliability and stability of automatic lines in wood-working. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 45: 111-114. doi: <https://doi.org/10.36930/42194514>
85. **Orikhovskyy R.Ya.** (2007). Increasing the reliability of automated production systems in the forestry complex. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 33: 41-45.
86. **Orikhovskyy R.Ya.** (2008). Parameters of reliability of the automated manufacturing systems in a wood-working industry. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 34: 163-167.
87. **Orikhovskyy R.Ya.** (2010). The reliability of the automated production systems in wood-working industry. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 36: 112-116.
88. **Orikhovskyy R.Ya.** (2011). Problems of reliability of hardwares in computer-aided systems of technological processes control. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 37(2). 50-52.
89. **Orikhovskyy R.Ya.** (2012). The influence of hardware reliability on technological indexes of efficiency. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 38: 69-72.
90. **Orikhovskyy R.Ya.** (2013). Research on the influence of equipment reliability on the efficiency of automatic lines operation. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 39(1). 24-27.
91. **Orikhovskyy R.Ya.** (2016). The influence of equipment reliability on the stability of manufacturing operations and efficiency of auto-mated production systems. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 42: 13-15. doi: <https://doi.org/10.36930/42164202>
92. **Orikhovskyy R.Ya.** (2018). The influence of stability of technological operations on the efficiency of functioning of automatic lines in woodworking. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 44: 58-63. doi: <https://doi.org/10.36930/42184408>
93. **Orikhovskyy R.Ya.** (2021). The estimation of losses of working time in production systems and work stability of automatic lines in the field of woodworking . Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 47:16-21 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214702>

94. **Orikhovskyy R.Ya., Gayda S.V.** (2020). The influence of different parameters of stability of production sites on the efficiency of functioning of woodworking production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 46:49-53 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42204605>
95. **Orikhovskyy R.Ya., Gayda S.V.** (2024). Determination of runnibg time losses in automated processing systems of woodworking. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 41-51 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245004>
96. **Shuaichong Wei, Mustapha Nourelfath, Nabil Nahas.** (2023). Analysis of a production line subject to degradation and preventive maintenance *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 230, Feb.2023,108906.<https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108906>
97. **Shuyuan Gan, Nan Shen.** (2023). Maintenance Optimization for a Production System Subject to Shocks Considering a Buffer Inventory and Production Defects. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 238, 109487. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109487>
98. **Street M.W.** (2001). Quick Response Inventory Replenishment for a Photographic Material Supplier, M.B.A. and M.S. in Leaders for Manufacturing, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
99. **Tan B. and Gershwin S.B.** (2001). On Production and Subcontracting Strategies for Manufacturers with Limited Capacity and Backlog-Dependent Demand. *Operations Research Center, Massachusetts Institute of Technology, Working Paper, OR354-01.*
100. **Williams D.I.** (2008). *Manufacturing systems: an introduction to the technologies.* – Open University Press Milton Keynes, England, 2008 p.
101. **Yifan Zhou, Yiming Guo, Tian Ran Lin, Lin Ma.** (2018). Maintenance optimisation of a series production system with intermediate buffers using a multi-agent FMDP. *Reliability Engineering & System Safety* 180: 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.07.008>

UDC 658.527.011. *Assoc. prof. R.Ya. Orikhovskyy, PhD; prof. S.V. Gayda, Doctor of Sciences; assoc. prof. S.A. Grytsak, PhD; senior lecturer L.V. Salapak – UNFU*

Choice of the sequence of productivity of machinery in automated production systems of the woodworking manufacturing

A method for selecting the sequence of machine tool productivity in automated production systems of woodworking production has been developed. The method is expedient to use for arranging automated lines with optimal productivity and efficiency of functioning. An analysis of technological operations of woodworking and the efficiency of functioning of automated lines has been carried out. It has been established that the reason for the low efficiency of automated lines at enterprises of the woodworking industry is the low stability of technological operations, as well as the incorrect selection of the sequence of machine tool productivity. Wood processing is subject to stochastic influences. The dimensional and qualitative characteristics of raw materials, the state of technological equipment, and the organization of the technological process have a significant impact on the productivity of automatic lines. The proposed methodology uses simulation modeling to study the structure of automated lines and increase their productivity. It has been established that automated lines with highly stable equipment have significantly higher efficiency and production productivity.

Keywords: automated woodworking production lines; woodworking machines; layout of automated lines; stability parameter of technological operations; productivity of automated lines.



Проф. С.В. Гайда¹, д-р техн. наук – НЛТУ України

АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ ОБСЯГІВ ВИРОБНИЦТВА КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В УКРАЇНІ ТА ЄВРОПІ

Обґрунтовано значимість деревообробної галузі лісопромислового комплексу України з позиції циркулярної економіки, так як ця модель економіки акцентує реалізацію своїх принципів на зменшенні залишків та відходів, повторному комплексному використанні деревинних ресурсів в цілому. Проаналізовано показники плитної продукції за семирічний період (2018-2024 рр.) із середніми показниками виробництва для таких матеріалів: деревинностружкові плити (2267,00 тис. м³), орієнтовано-стружкові плити з деревини (152,14 тис. м³), деревинноволокнисті плити MDF середньої щільності (242,14 тис. м³), фанера (210,00 тис. м³) та шпон (220,14 тис. м³). Детально проаналізовано динаміку виробництва деревинностружкових плит в Україні за період з 2018 по 2024 рр. з індексами зростання та спадання: 2018/2019 – 88,90 %; 2019/2020 – 97,01 %; 2020/2021 – 133,80 %; 2021/2022 – 59,65 %; 2022/2023 – 113,60 %; 2023/2024 – 108,60 %. Проаналізовано показники плитної продукції за трирічний період (2021-2024 рр.) для країн ЄС із середніми показниками виробництва для таких матеріалів: деревинностружкові плити (31,55 млн. м³), орієнтовано-стружкові плити з деревини (6,83 млн. м³), деревинноволокнисті плити MDF середньої щільності (12,08 млн. м³), фанера (2,81 млн. м³). Запропоновано шляхи забезпечення сировиною деревообробну галузь в контексті циркулярної економіки, що полягають, в першу чергу, у використанні відходів деревини, як основної ідеї циркулярної економіки щодо перетворення відходів та залишків на ресурс для створення деревинних плитних матеріалів, таких як ДСП, MDF та OSB, що безперечно економить природні ресурси. Побудовано лінії тренду та отримано коефіцієнти детермінації, що характеризують стан, динаміку та перспективи виробництва деревинних конструкційних плитних матеріалів в Україні: при високих R² (0,8–0,95), виробництво деревинних плит демонструє чітку тенденцію (зростання або спад) без різких відхилень, що свідчить про відносну стабільність галузі та прогнозованість; при низьких R² (0,2–0,5), отримуємо сигнали про нестабільність: можливо, ринок дуже чутливий до коливань цін на сировину, курсу валют чи політичних ризиків. Таким чином, на основі отриманих R² можливо чітко зрозуміти, наскільки надійною є аналізована тренд-модель, і спланувати подальші аналітичні та управлінські дії.

Ключові слова: матеріали, вироби з деревини, деревинностружкові плити, деревинноволокнисті плити, MDF-плити, орієнтовано-стружкові плити, фанера, шпон, динаміка показників, циркулярна економіка, Industry 5.0.

Вступ. У сучасних умовах зростаючого попиту на деревину та деревинні матеріали поряд із загостренням екологічних викликів концепція циркулярної економіки [1, 2, 3, 23, 44, 46, 48, 49, 59, 62, 63] набуває особливої ваги для деревообробної та меблевої галузей. В Україні й Європі виробництво пиломатеріалів, ДСП [12, 13, 35, 50, 80], OSB, MDF та готових меблевих виробів традиційно пов'язане з інтенсивним споживанням лісових ресурсів [29, 32, 36, 39, 41, 47, 52, 54, 64, 83, 87] і формуванням значних обсягів відходів. Перехід до замкнутих циклів, що передбачають повторне використання деревинних відходів, рециклінг та перероблення упаковки та вживаної деревини [9, 10, 11, 13, 21, 25, 33, 39, 43, 51, 63], здатен не лише зменшити навантаження на лісові екосистеми, а й оптимізувати виробничі витрати й підвищити конкурентоспроможність підприємств.

¹ Гайда Сергій Володимирович – академік Лісівничої академії наук України, доктор технічних наук, професор кафедри технологій меблів і виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-258-31-75, +38-067-791-25-22. E-mail: serhiy.hayda@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7468-5661> ResearcherID: ABB-1636-2021 Scopus/authorID=57221587964

Мета дослідження – системний аналіз тенденцій обсягів виробництва конструкційних деревинних матеріалів і меблевої продукції в Україні в порівнянні з європейськими ринками за останні п'ять років, а також оцінити стан, обґрунтувати проблеми та розробити шляхи розвитку деревообробної галузі в контексті циркулярної економіки, аналізуючи динаміку показників виробництва щитових конструкційних матеріалів для меблевого виробництва.

Завдання дослідження: Виявити основні тренди росту чи спаду виробництва деревинних матеріалів і меблевих виробів в Україні та ключових країнах Європи. Оцінити ступінь інтеграції циркулярних моделей у виробничі ланцюги деревообробних і меблевих підприємств. Визначити бар'єри й драйвери переходу до замкнутих систем ресурсокористування. Сформулювати рекомендації для оптимізації виробничих процесів із урахуванням європейського досвіду та національних особливостей, що сприятимуть стійкому розвитку галузі. Такий підхід дозволить отримати цілісне уявлення про стан і перспективи деревообробної та меблевої галузей у контексті переходу до циркулярної економіки.

Актуальність. У контексті глобального переходу до циркулярної економіки [1, 2, 3, 23, 44, 46, 48, 49, 59, 62, 63] деревообробна та меблева галузі відіграють ключову роль у збереженні лісових ресурсів та зменшенні обсягів відходів. В Україні ця тема набуває особливої ваги через потребу у відновленні критичної інфраструктури та одночасному виконанні зобов'язань «Зеленого курсу» ЄС. Зростання попиту на деревинні матеріали для реконструкції та будівництва прискорює виснаження лісових екосистем і породжує велику кількість технологічних відходів (тирси, обрізки, відходи лакофарбових покриттів). Водночас європейські країни демонструють успішні практики рециклінгу деревинних відходів, ремануфактурингу меблів та застосування біокомпозитів із вторинної сировини. Аналіз цих трендів є необхідним для формування національної стратегії сталого розвитку деревообробного сектору та зниження його екологічного сліду. Циркулярна економіка є надзвичайно актуальною в контексті забезпечення деревообробної галузі деревинною сировиною в Україні, що проявляється у зменшенні витрат деревини через більш ефективне використання ресурсів; переробленні та повторному використанні деревини через впровадження заходів із заготівлі вживаної деревини; зниження витрат виробництва та підвищення конкурентоспроможності через нижчу собівартість вторинної деревинної сировини. Це не лише забезпечить сталий розвиток галузі, але й сприятиме збереженню природних ресурсів та підвищенню екологічної свідомості населення. Актуальність функціонування деревообробної галузі в рамках циркулярної економіки оцінюється оптимізацією використання ресурсів; зниженням виробничих витрат для підприємств; стимулюванням розвитку нових технологій та процесів, які дозволяють більш ефективно використовувати ресурси.

Проблемність. Незважаючи на загальну визнаність важливості циркулярних підходів, українська деревообробна та меблева промисловість стикається з низкою критичних перешкод: Відсутні узгоджені показники обсягу збору та переробки деревинних відходів, що унеможливорює точну оцінку потенціалу вторинної сировини й ефективності існуючих практик. Багато підприємств працюють на застарілому обладнанні без модулів для сортування й підготовки відходів до рециклінгу, що призводить до значних втрат матеріалу та підвищених витрат. Нечітка

законодавча база щодо стандартів переробки деревини та відсутність стимулів для впровадження «зелених» технологій стримують інвестиції в модернізацію. Недостатня обізнаність виробників та споживачів про переваги та моделі замкнутого циклу, а також низька купівельна спроможність у сегменті екоорієнтованої меблі, створюють слабкий внутрішній ринок для продукції з вторинної сировини. Для подолання цих проблем деревообробній галузі необхідно впроваджувати інноваційні технології [30, 38, 55, 61, 65, 66, 70, 79, 86, 89], покращувати управління ресурсами, підвищувати кваліфікацію кадрів та працювати над стійким розвитком. Крім того, подолання цих проблем потребує комплексного дослідження динаміки виробництва та практик циркулярного ресурсокористування в Україні й порівняння їх із європейським досвідом, аби визначити пріоритетні напрями розвитку та розробити дієві рекомендації.

Огляд основних наукових праць, які стосуються залучення додаткових деревинних ресурсів для виробництва конструкційних плитних матеріалів [6, 14, 16, 33, 34, 50, 68, 78, 81, 84, 92] у контексті циркулярної економіки:

- Деякі із робіт стосуються утилізації відходів деревини та вже діючих практик рециклінгу у виробництві ДСП і MDF, що засвідчує потенційні напрями підвищення циркулярності, зокрема використання відходів пакувальних матеріалів та вживаної деревини [9, 10, 11, 13, 21, 25, 33, 39, 43, 51, 63]. Останніми роками появляються наукові роботи, що присвячені вживаній деревині, як перспективному ресурсу для використання у виробництві конструкційних матеріалів із заданими властивостями [15, 16, 24, 28, 37, 58, 71, 72, 76, 77, 82, 85]/

- Більшість досліджень сконцентровані на додаванні відсотку вторинної деревини (зокрема відходів ДСП та ламелей) до фракцій для виготовлення нових плит, що дозволяє зменшити викиди парникових газів і економити первинні лісові ресурси. Для цього вже пропонуються розроблені прогресивні технології [10, 14, 18, 25, 74] з перероблення додаткових ресурсів на вироби з деревини : дерево-стружкові плити (ДСП), деревоволокнисті плити (MDF) або OSB.

- Оглядова стаття Hoffmann et al. [39] розглядає можливості залучення швидкоростучих видів дерев, залишків від лісозаготівлі, ушкодженої вогнем деревини та урбаністичних відходів (очищення парків, обрізки вулиць) як доповнення до звичайної сировини. Автори відзначають, що ці неконвенційні ресурси можуть забезпечити до 15 % необхідного обсягу деревини без додаткового тиску на лісові екосистеми, проте потребують адаптації технологічних процесів для попереднього очищення та сортування [10, 14, 18, 25, 74].

- У статтях про стан виробництва деревинних плит в Україні за 2021-2023 роки зафіксовано такі перепади: для ДСП 2021/2022 – 59,65 %; 2022/2023 – 113,60 %; для OSB 2021/2022 – 78,31 %; 2022/2023 – 115,38 %; для MDF 2021/2022 – 84,73 %; 2022/2023 – 113,30 % [2, 4, 5, 22, 23, 39, 50, 56, 57, 60, 80, 81, 91]. Зниження виробництва у 2022 р., можна пояснити тим, що водночас частка вторинної сировини у фракціях залишається на рівні лише 5–7 % через брак належної інфраструктури та нормативної підтримки.

- Крім того, дослідження в НЛТУ України показують, що лише 10 % зібраних в Україні відходів деревини використовуються повторно, тоді як 66 % відправляється на полігони або компостування, що свідчить про недоцільне втрачання цінних ресурсів [9, 10, 11, 13, 21, 25, 33, 39, 43, 51, 63].

• Незважаючи на значний потенціал, у літературі наголошують на низці перешкод: відсутність єдиних стандартів якості для ДСП [12, 13, 35, 50, 80] та столярних плит із вживаної деревини [20, 21, 24, 26, 31, 40, 43, 67, 52, 54, 64, 83, 87], для меблевих щитів із вживаної деревини [6, 17, 19, 27, 45, 75, 76, 77], нерозвиненість ланцюгів збирання й сортування відходів, а також економічно виправдані технології їх переробки. Подальші дослідження мають бути присвячені реалізації принципів циркулярної економіки в деревообробній галузі з метою сприяння економічного зростання, збереженню природних ресурсів та покращення екологічної ситуації [7, 8, 53, 54].

Результати аналізу динаміки показників виробництва плитних конструкційних матеріалів. У рамках циркулярної економіки, динаміка показників основних плитних конструкційних матеріалів важлива з огляду на забезпечення стійкості, ефективного використання ресурсів та мінімізацію відходів. Проаналізуємо динаміку обсягів випуску основної продукції деревообробної галузі, зокрема для таких матеріалів: ДСП – деревинностружкові плити (Particleboard, of wood); MDF – деревинноволокнисті плити середньої щільності (Medium density fibreboard); OSB – орієнтовано-стружкові плити з деревини (Oriented strand board (OSB), of wood); фанера та фанерні плити; шпон, завтовшки до 6 мм.

Споживання вітчизняної ДСП в меблевому секторі України за різними оцінками складає 60-65%, а інші 35-40% припадають на імпорт. За прогнозами експертів, споживання вітчизняної плити зростатиме. Тенденція показників виробництва деревинностружкових плит в Україні, тис.м³ за період з 2018 по 2024 рр. наведено на рис. 1. Динаміка обсягів виробництва ДСП в Україні між суміжними роками наступна : 2018/2019 – 88,90 %; 2019/2020 – 97,01 %; 2020/2021 – 133,80 %; 2021/2022 – 59,65 %; 2022/2023 – 113,60 %; 2023/2024 – 108,60 %.

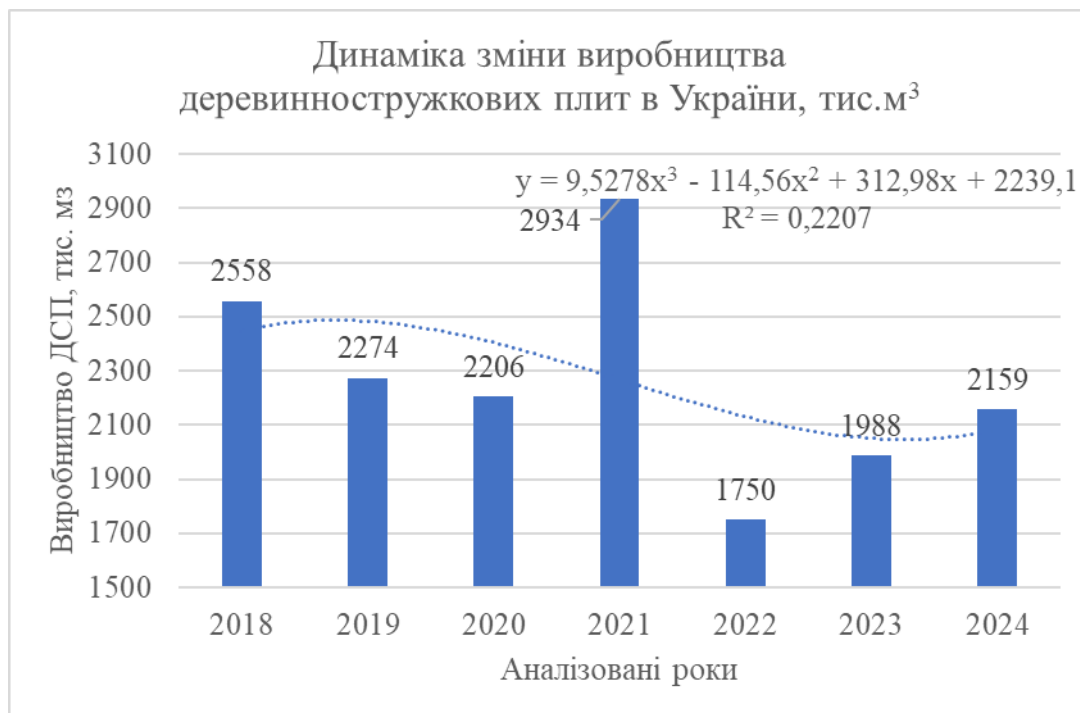


Рис. 1. Тенденція показників виробництва деревинностружкових плит в Україні, тис.м³ за семирічний період з 2018 по 2024 рр.

Для порівняння обсяги виробництва ДСП у Європі, млн.м³ наведено на рис. 2. У 2024 році у країнах ЄС було вироблено 28,3 млн. м³ ДСП плит.

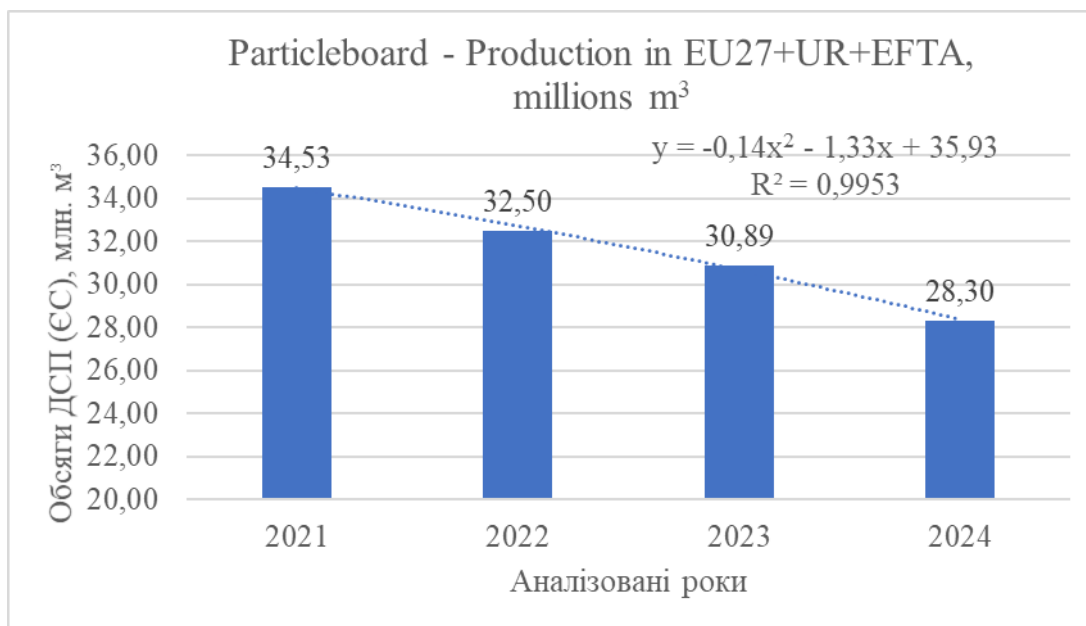


Рис. 2. Тенденція показників обсягів виробництва деревинностружкових плит у Європі, млн.м³ за період з 2021 по 2024 рр.

Перспективним конструкційним матеріалом, що випускається в Україні є OSB плити. Тенденція показників виробництва OSB плит в Україні, тис.м³ за період з 2018 по 2024 рр. наведено на рис. 3. ТОВ «SWISS KRONO» виготовляє в Україні плити типу OSB/3, що придатні для використання у вологих умовах, форматом 2500×1250 мм, згідно розробленої «Інструкції з експлуатації плити OSB/3. OSB 16.21.13-16.00 ІЕ:2020». Динаміка обсягів виробництва OSB плит в Україні між суміжними роками наступна : 2018/2019 – 93,75%; 2019/2020 – 106,67 %; 2020/2021 – 103,75%; 2021/2022 – 78,31 %; 2022/2023 – 115,38 %; 2023/2024 – 99,33 %.



Рис. 3. Тенденція показників виробництва OSB плит в Україні, тис.м³ за семирічний період з 2018 по 2024 рр.

Виробництво OSB плит у світі розвивається швидкими темпами. Якщо у 1997 р. в Європі було виготовлено тільки 0,6 млн. м³ OSB плит, то у 2024 р. у країнах ЄС було вироблено 6,96 млн. м³ (рис. 4).

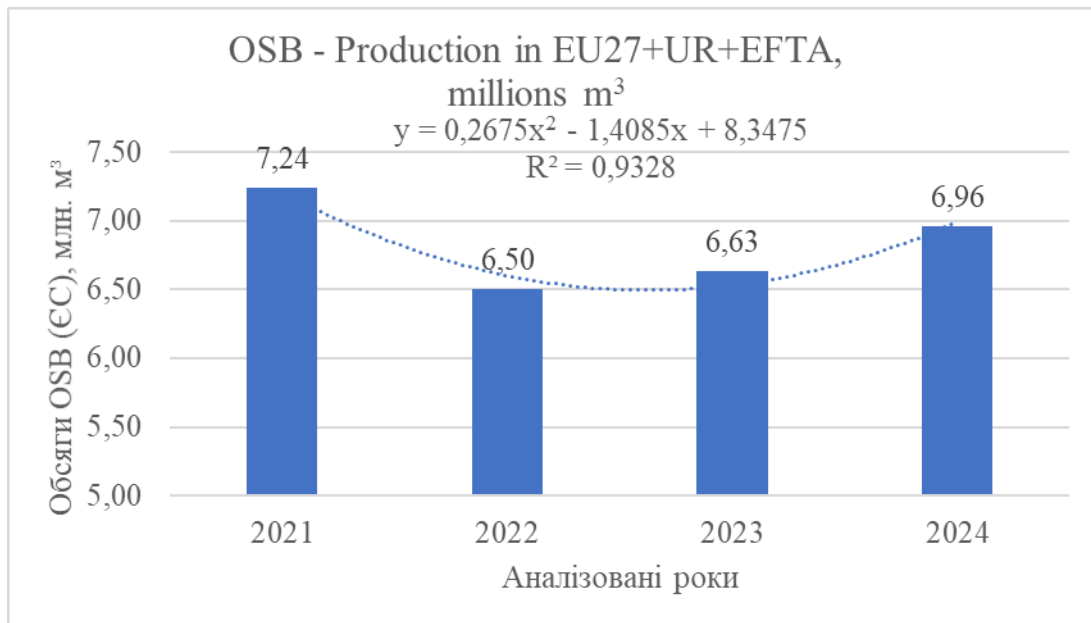


Рис. 4. Тенденція показників обсягів виробництва OSB плит у Європі, тис.м³

Іншим конструкційним матеріалом є деревинноволокнисті плити (ДВП). Тенденція показників виробництва MDF-плит середньої щільності (400-800 кг/м³) в Україні, тис.м³ за період з 2018 по 2024 рр. наведено на рис. 5. Динаміка падіння та зростання обсягів виробництва MDF-плит в Україні між суміжними роками наступна : 2018/2019 – 114,95 %; 2019/2020 – 112,56 %; 2020/2021 – 109,56 %; 2021/2022 – 84,73 %; 2022/2023 – 113,30 %; 2023/2024 – 98,48 %.

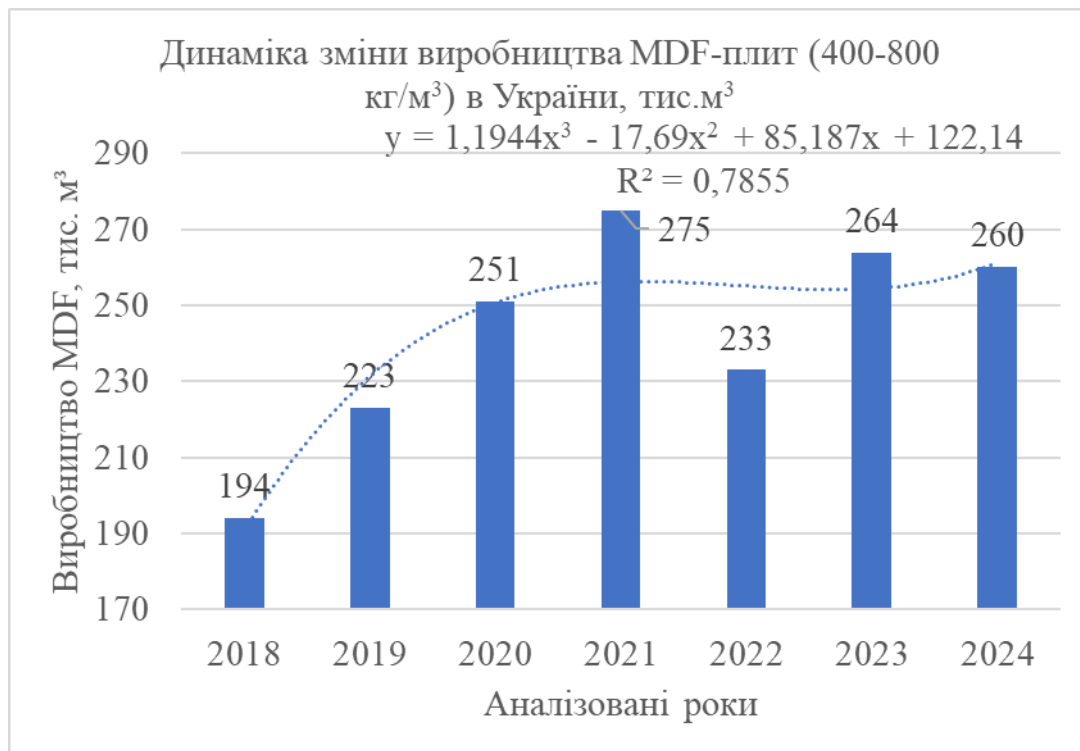


Рис. 5. Тенденція показників виробництва MDF-плит середньої щільності (400-800 кг/м³) в Україні, тис.м³ за семирічний період з 2018 по 2024 рр.

Перш за все, класифікацію ДВП здійснюють за щільністю: м'які (SDF, 100-400 кг/м³); плити середньої щільності (MDF, 400-800 кг/м³); тверді (HDF, 830-870 кг/м³); надтверді (950-1100 кг/м³). Плити MDF – це конструкційний та один з найперспективніших матеріалів для меблевої промисловості. Останнім часом меблева промисловість України все більше починає використовувати прогресивні конструкційні плитні матеріали, зокрема деревинноволокнисту плиту середньої щільності межах (400-800 кг/м³) – MDF (Medium Density Fiberboard). Вважається, що споживання MDF у 2024 році в Україні склало близько 440-460 тис. м³, що, при населенні України у 2024 р. на рівні 32,5 млн осіб, становить 12,4-13,8 м³/1000 чоловік. Оскільки, в країнах ЄС споживання деревинноволокнистих плит становить майже 11 млн. м³, а при населенні 448,4 млн осіб в 2024 р., показник на 1000 чоловік слав 24,5 м³. Тому, вбачається високий потенціал розвитку цього ринку в Україні, який може скласти не менше 1 млн. м³. І, звісно, Коростеньський завод MDF потужністю 300 тис. м³ в рік, що функціонує під торговою маркою REZULT, буде забезпечувати плитою зростаюче споживання.

Масове виробництво ДВП мокрим способом почалося ще 100 років тому – у 1924 році. Індустріальним методом перша плита MDF була виготовлена в 1965 році в США. В Європі перші плити MDF з'явилися у 70-х роках. Сьогодні у країнах ЄС працюють понад 50 підприємств із виробництва плит MDF, що виготовляють більше 38-40 % від світового виробництва (рис. 6). У 2024 році у країнах ЄС було вироблено 10,94 млн. м³ MDF плит.

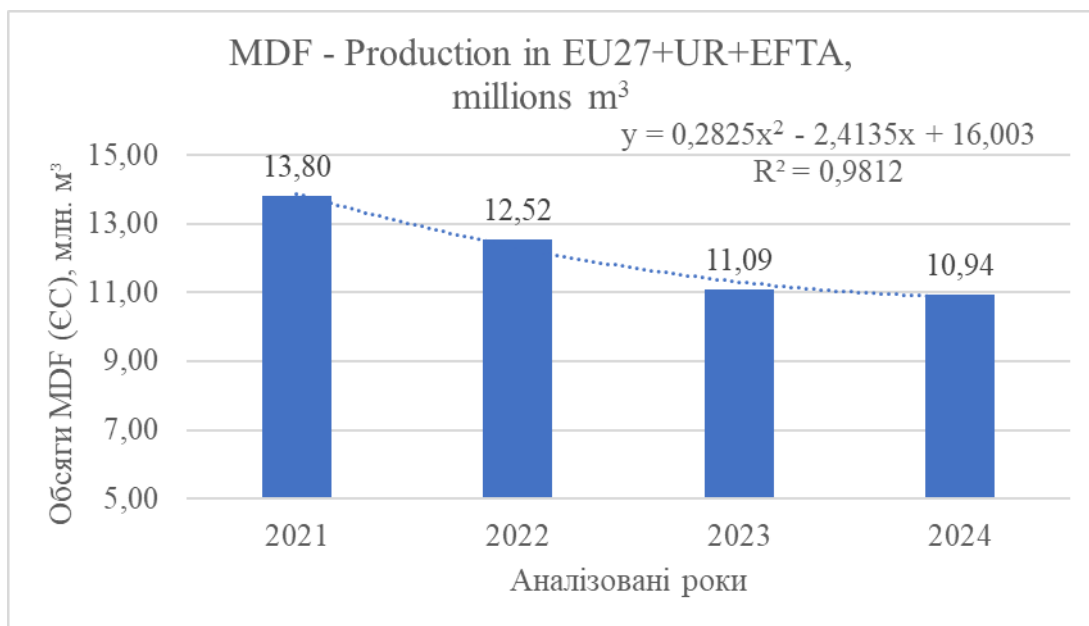


Рис. 6. Тенденція показників обсягів виробництва MDF плит у Європі, тис.м³ за чотирирічний період з 2021 по 2024 рр.

Необхідно зазначити, що у рамках циркулярної економіки, динаміка показників фанери, шпону та інших конструкційних матеріалів також базується на принципах стійкості, ефективності ресурсів та мінімізації впливу на довкілля. Це включає інновації у виробництві, застосування екологічних стандартів та регуляцій, а також адаптацію до змінних умов ринку та уподобань споживачів.

Тенденція показників виробництва фанери в Україні, тис.м³ за період з 2018 по 2024 рр. наведено на рис. 6. Динаміка обсягів виробництва фанери між

суміжними роками наступна: 2018/2019 – 93,16 %; 2019/2020 – 102,26 %; 2020/2021 – 106,63 %; 2021/2022 – 105,18 %; 2022/2023 – 101,97 %; 2023/2024 – 104,55 %.

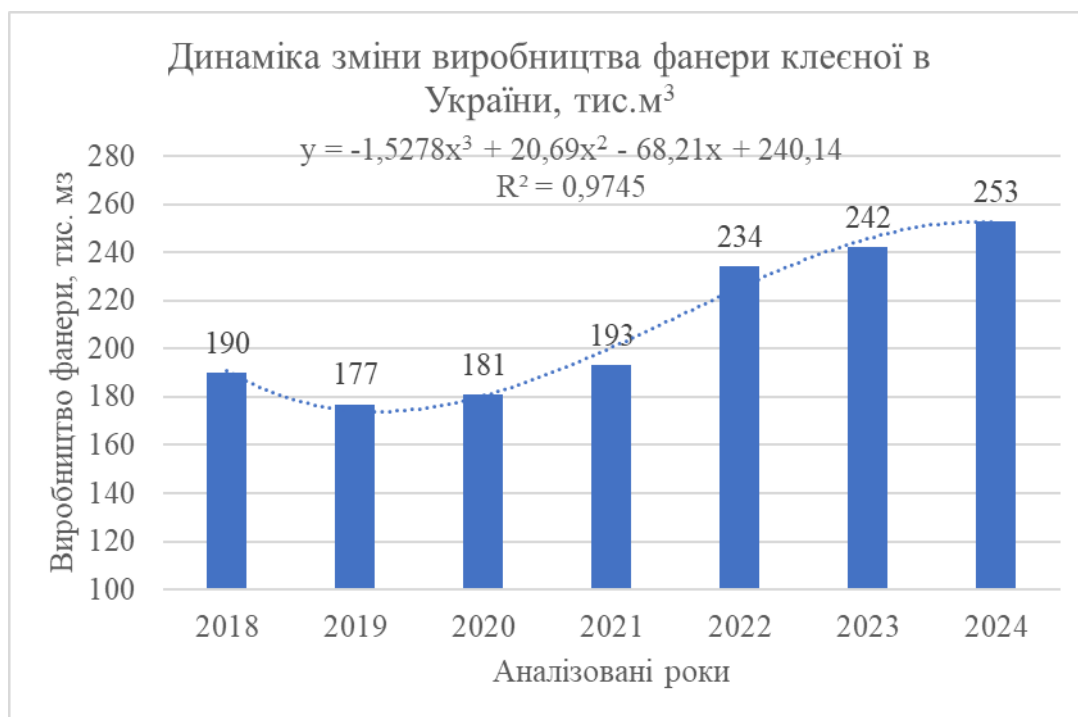


Рис. 6. Тенденція показників виробництва фанери в Україні, тис.м³ за семирічний період з 2018 по 2024 рр.

Для порівняння обсяги виробництва фанери у Європі, млн.м³ наведено на рис. 7. У 2024 році у країнах ЄС було вироблено 2,45 млн. м³ ДСП плит.

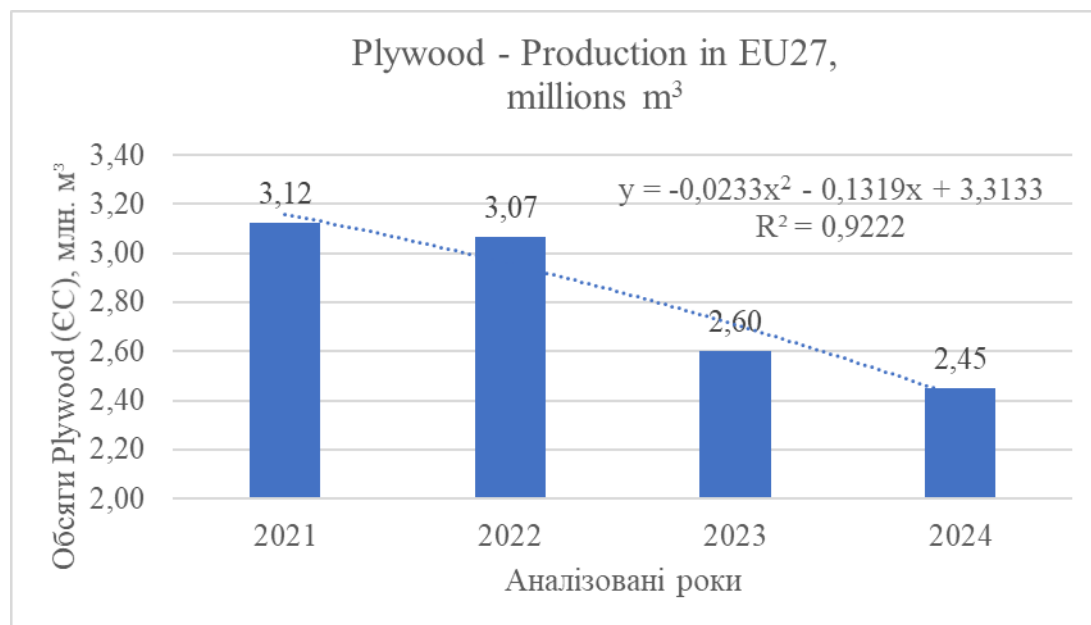


Рис. 7. Тенденція показників обсягів виробництва фанери у Європі, млн.м³ за період з 2021 по 2024 рр.

Тенденція показників виробництва шпону в Україні, тис.м³ за період з 2018 по 2024 рр. наведено на рис. 8. Динаміка падіння та зростання обсягів виробництва шпону в Україні між суміжними роками наступна : 2018/2019 – 101,41 %;

2019/2020 – 95,83 %; 2020/2021 – 116,43 %; 2021/2022 – 87,14 %; 2022/2023 – 106,19 %; 2023/2024 – 103,59 %.

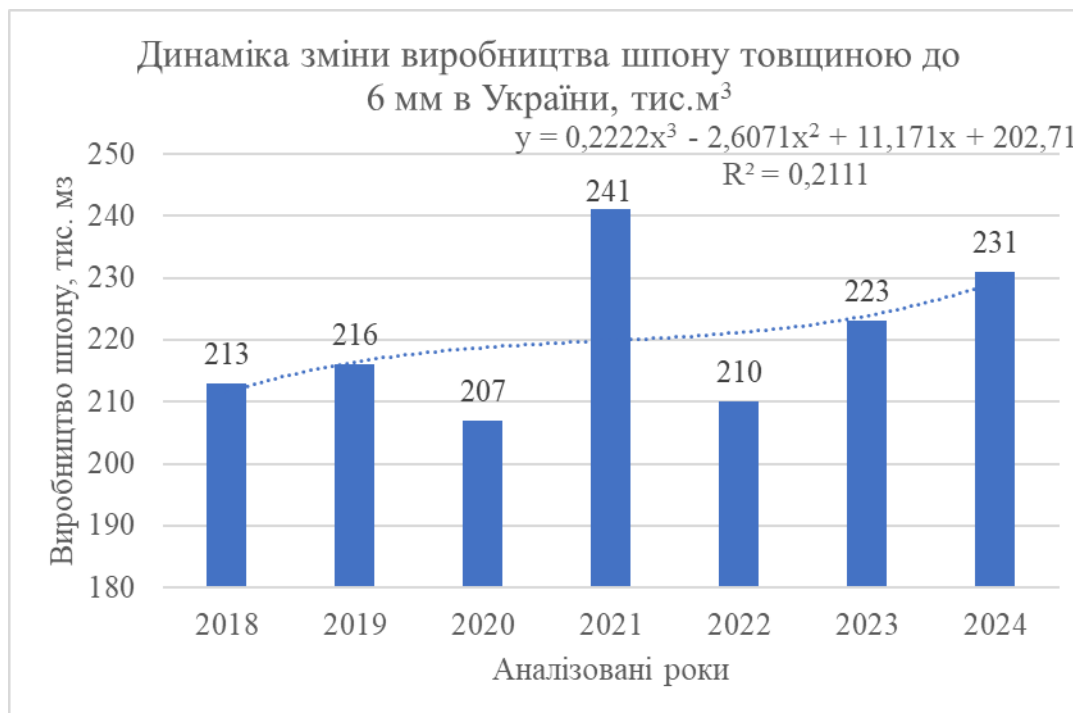


Рис. 8. Тенденція показників виробництва шпону в Україні, тис.м³ за семирічний період з 2018 по 2024 рр.

Пропозиції до забезпечення деревинною сировиною для виробництва конструкційних матеріалів. Розроблення шляхів забезпечення сировиною деревообробної галузі в контексті циркулярної економіки є важливим кроком до сталого розвитку та збереження природних ресурсів.

Циркулярна економіка спрямована на мінімізацію відходів і максимальне використання ресурсів протягом всього життєвого циклу продукту. Основні шляхи наступні:

- Використання відновлюваних ресурсів методом активного впровадження практик сталого управління лісами, включаючи планові рубки, висадку нових дерев та підтримку біорізноманіття. Перероблення деревинних залишків та відходів методом впровадження ефективних технологій щодо залучення цього ресурсу до виробництва конструкційних матеріалів.

- Реалізація принципів циркулярної економіки шляхом підтримки програм зі збирання та перероблення старих дерев'яних виробів для повторного використання у виробництві. Оптимізація виробничих процесів шляхом впровадження технологій, які знижують відходи виробництва та підвищують ефективність використання деревини. А також розроблення виробів з деревини з урахуванням можливості їх ремонту, повторного використання та рециклінгу.

- Розширення джерел сировини, тобто використання швидкоростучих видів дерев способом культивування видів дерев, які швидко ростуть і можуть забезпечити стабільні обсяги сировини. Впровадження цих шляхів забезпечення сировиною в деревообробній галузі в контексті циркулярної економіки сприятиме збереженню природних ресурсів, зменшенню негативного впливу на довкілля та створенню більш стійкої та ефективної економіки.

Висновки.

1. Обґрунтовано значимість деревообробної галузі лісопромислового комплексу України з позиції циркулярної економіки, так як ця модель економіки акцентує реалізацію своїх принципів на зменшенні залишків та відходів, повторному комплексному використанні деревинних ресурсів в цілому. Проаналізовано показники плитної продукції за семирічний період (2018-2024 рр.) із середніми показниками виробництва для таких матеріалів: деревинностружкові плити (2267,00 тис. м³), орієнтовано-стружкові плити з деревини (152,14 тис. м³), деревинноволокнисті плити MDF середньої щільності (242,14 тис. м³), фанера (210,00 тис. м³) та шпон (220,14 тис. м³). Детально проаналізовано динаміку виробництва деревинностружкових плит в Україні за період з 2018 по 2024 рр. з індексами зростання та спадання : 2018/2019 – 88,90 %; 2019/2020 – 97,01 %; 2020/2021 – 133,80 %; 2021/2022 – 59,65 %; 2022/2023 – 113,60 %; 2023/2024 – 108,60 %.

2. Проаналізовано показники плитної продукції за трирічний період (2021-2024 рр.) для країн ЄС із середніми показниками виробництва для таких матеріалів: деревинностружкові плити (31,55 млн. м³), орієнтовано-стружкові плити з деревини (6,83 млн. м³), деревинноволокнисті плити MDF середньої щільності (12,08 млн. м³), фанера (2,81 млн. м³).

3. Запропоновано шляхи забезпечення сировиною деревообробну галузь в контексті циркулярної економіки, що полягають, в першу чергу, у використанні відходів деревини, як основної ідеї циркулярної економіки щодо перетворення відходів та залишків на ресурс для створення деревинних плитних матеріалів, таких як ДСП, MDF та OSB, що безперечно економить природні ресурси. Побудовано лінії тренду та отримано коефіцієнти детермінації, що характеризують стан, динаміку та перспективи виробництва деревинних конструкційних плитних матеріалів в Україні: при високих R^2 (0,8–0,95), виробництво деревинних плит демонструє чітку тенденцію (зростання або спад) без різких відхилень, що свідчить про відносну стабільність галузі та прогнозованість; при низьких R^2 (0,2–0,5), отримуємо сигнали про нестабільність: можливо, ринок дуже чутливий до коливань цін на сировину, курсу валют чи політичних ризиків. Таким чином, на основі отриманих R^2 можливо чітко зрозуміти, наскільки надійною є аналізована тренд-модель, і спланувати подальші аналітичні та управлінські дії.

References

1. Blomsma, F., & Brennan, G. (2017). The emergence of circular economy: a new framing around prolonging resource productivity. *J. Ind. Ecol.*, 21, pp. 603-614, <https://doi.org/10.1111/jiec.12603>.
2. Circular economy industry platform. <http://www.circular.eu/project/renault-closed-loop/>
3. Circularity Gap Report (2022). five years of analysis by Circle Economy https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/1_report_cgr_global_2022
4. European Commission (2015). Closing the Loop – an Action Plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels. (2015), <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
5. European Panel Federation. <https://europanel.org/press-release-epf-agm-2024>
6. Gayda S.V. (2007). Research of concentration of operations in modern furniture Production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 33:73-79 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/42073314>

7. **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 June 23-26. 2013). TU Zvolen, 119-130.
8. **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).
9. **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.
10. **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>
11. **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>
12. **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.
13. **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.
14. **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).
15. **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.
16. **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>
17. **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.
18. **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>
19. **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>.
20. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). *Bulletin of KhNTUA* 197:3-9, (in Ukrainian).
21. **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).
22. **Gayda S.V.** (2023). State and analysis of the dynamics indicators of the production volume of the woodworking and furniture industry. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 4-19 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234901>
23. **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>
24. **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>
25. **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>.
26. **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>.

27. **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>
28. **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>.
29. **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>
30. **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>
31. **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>
32. **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>
33. **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.
34. **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>
35. **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>
36. **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>
37. **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>
38. **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>
39. **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>
40. **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>
41. **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>
42. **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>
43. **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>
44. **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>.
45. **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).

46. **Project «CircHive – Developing & piloting biodiversity footprinting & natural capital accounting via a 'beehive' of sectoral hubs, for sustainable transition to a circular EU bioeconomy».** Project Schedule: Start Date 01.12.2022 End Date 30.11.2027.
47. **Ratajczak, E.** (2003). *Zasoby odpadów drzewnych w Polsce* / E. Ratajczak, A Szostak. Poznań: Czysta Energia, – Vol. 6. – P. 122-125.
48. **Reike, D., & Vermeulen Walter, J.V.** (2018). The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? // *Resources, Conservation and Recycling*. P. 246-264.
49. **Shevchenko T. I., Shuptar-Porivayeva N. Y., Gubanova O. R. and others.** (2022). *Циркулярна економіка [Circular economy]*. Sumy: University book. – 220 p. (in Ukrainian).
50. **State Statistics Service of Ukraine.** <https://www.ukrstat.gov.ua>
51. **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*,
52. **Titus, B.D., Brown, K., & Helmisaari, HS. et al.** (2021). Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines. *Energ Sustain Soc* 11, 10. <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00281-w>.
53. **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>.
54. **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>.
55. **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>.
56. **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>
57. **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>
58. **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>
59. **Гайда С.В.** Встановлення показника циркулярності в лісовому секторі: матеріали тез XIV МН-ПК (23–24.05.2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.2. – С. 192-194.
60. **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>
61. **Гайда С.В.** Основи створення гнучких виробничих систем. Гнучкі автоматизовані виробництва та робототехніка в деревообробці: Ч.1. – Львів: ЦНТЕІ, 1998. – 149 с.
62. **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>
63. **Гайда С.В.** Технології вживаної деревини як дієві механізми для реалізації принципів циркулярної економіки: матеріали тез НПК (05-06.06.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 137-139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17079555>
64. **Гайда С.В., Гузь М.М., Никитюк Л.О.** Корневая древесина-источник дополнительного сырья для плитного производства. Тези НТК (21-25.09.92). Архангельск:ЦНИИМОД. – С.88-89.
65. **Гайда С.В., Кшивецький Б.Я.** Оперативно-виробниче планування гнучких виробничих систем // Метод. вказівки. – Львів : ЦНТЕІ, 2000. – 29 с.
66. **Гайда С.В., Кшивецький Б.Я.** Проектування гнучких виробничих систем: Метод. вказівки. – Львів : ЦНТЕІ, 1998. – 34 с.
67. **Гайда С.В., Лесів Л.Е.** Міцність комбінованих столярних плит із вживаної деревини ялиці: матеріали тез Н-ПК (24-25.05.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 128-130. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
68. **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>

69. **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.
70. **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>
71. **Гайда С.В., Медвідь Л.В.** Дослідження міцності при статичному згині столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез Н-ПК (7-8.10.2024 р.). – Харків : ДБТУ, 2024. – С. 193-195. <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/conf-07-08-10-24-mater.pdf>
72. **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.
73. **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>
74. **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>
75. **Гайда С.В., Подібка Т.І.** Вплив товщини рейок на формостійкість меблевих щитів: Матеріали тез XV МН-ПК (22-23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.1. – С. 184-186. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
76. **Гайда С.В., Подібка Т.І.** Забезпечення площинності меблевих щитів із бука європейського: матеріали тез Н-ПК (24-25.05.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 137-139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
77. **Гайда С.В., Подібка Т.І.** Формостійкість меблевих щитів із сосни звичайної: матеріали тез XIV МН-ПК (23–24.05.2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 211-212.
78. **Гайда С.В., Удовиський 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/>
79. **Гайда, С.В.** Перспективи роботизації меблевої промисловості України. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2003. – Вип. 11 – С. 36-37.
80. **Гайда, С.В.** Прогресивні плитні матеріали MDF та OSB. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 1 – С. 30-32.
81. **Гайда, С.В.** Що нам важко стілець зробити? Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 3 – С. 44-52.
82. **Грицак С.С., Грицак С.А., Гайда С.В.** Встановлення залежності довжини бездефектної дуги деревини ясеня 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/>
83. **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>
84. **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/>
85. **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>
86. **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/>
87. **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>
88. **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/>
89. **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>

90. **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>

91. **Смаль В.І.** Публічний звіт голови державного агентства лісових ресурсів України за 2024 рік, 65 стор. <https://www.openforest.org.ua/wp-content/uploads/2025/02/zvit-holovy-derzhavnoho-ahentstva-lisovykh-resursiv-ukrainy-za-2024-rik.pdf>

92. **Удовицький О.М., Гайда С.В. Салабай Р.Г.** Некондиційна деревина у бетонних виробках: Матеріали тез XV МН-ПК (22-23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.2. – С. 141-142. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>

UDC 674.001

Prof. S.V. Gayda, Doktor of Sciences – UNFU

Analysis of trends in the production volumes of construction materials in Ukraine and Europe

The significance of the woodworking industry of the Ukrainian forest industry complex from the perspective of a circular economy is substantiated, since this economic model focuses on the implementation of its principles on the reduction of residues and waste, the comprehensive reuse of wood resources as a whole. The indicators of board production for the seven-year period (2018-2024) are analyzed with average production indicators for the following materials: wood-based particleboards (2267.00 thousand m³), oriented strand boards (152.14 thousand m³), medium-density fiberboard (MDF) (242.14 thousand m³), plywood (210.00 thousand m³) and veneer (220.14 thousand m³). The dynamics of particleboard production in Ukraine for the period from 2018 to 2024 are analyzed in detail. with growth and decline indices: 2018/2019 – 88.90%; 2019/2020 – 97.01%; 2020/2021 – 133.80%; 2021/2022 – 59.65%; 2022/2023 – 113.60%; 2023/2024 – 108.60%. The panel production indicators for the three-year period (2021-2024) for EU countries were analyzed with average production indicators for the following materials: particleboard (31.55 million m³), oriented strand board (6.83 million m³), medium-density fiberboard (MDF) (12.08 million m³), plywood (2.81 million m³). Ways of providing raw materials to the woodworking industry in the context of a circular economy are proposed, which consist, first of all, in the use of wood waste, as the main idea of a circular economy regarding the conversion of waste and residues into a resource for the creation of wood-based panel materials, such as chipboard, MDF and OSB, which undoubtedly saves natural resources. Trend lines were constructed and determination coefficients were obtained that characterize the state, dynamics and prospects of the production of wood-based structural panel materials in Ukraine: at high R² (0.8–0.95), the production of wood-based panels demonstrates a clear trend (growth or decline) without sharp deviations, which indicates the relative stability of the industry and predictability; at low R² (0.2–0.5), we receive signals of instability: perhaps the market is very sensitive to fluctuations in raw material prices, exchange rates or political risks. Thus, based on the obtained R², it is possible to clearly understand how reliable the analyzed trend model is and plan further analytical and management actions.

Keywords: materials, wood products, particleboards, fiberboards, MDF boards, oriented strand boards (OSB), plywood, veneer, dynamics of indicators, circular economy, Industry 5.0



Проф. С.В. Гайда¹, д-р техн. наук; доц. О.Б. Ференц², к-т т.н. – НЛТУ України

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЕРЕВ'ЯНОГО БУДИНКОБУДУВАННЯ

Обґрунтовано, що технології дерев'яного будівництва продовжують розвиватися, і дерев'яні будинки набирають популярності завдяки своїй екологічності, енергоефективності та натуральному вигляду. Це робить деревину одним з найбільш затребуваних матеріалів для зведення житла. Проаналізовано два основні підходи до будівництва дерев'яних будинків: традиційні зруби з оциліндрованої колоди чи профільованого бруса та сучасна каркасна технологія, яка дозволяє створювати будинки типу «сендвіч». Кожен підхід має свої переваги, залежно від потреб замовника, енергетичних вимог та бюджету. Описані різні типи поперечних перерізів деревини для зведення зрубів, зокрема профільовані бруси з напівкруглим боком та оциліндровані колоди з компенсаційним пазом. Ці технології забезпечують високу міцність конструкцій і зручність у монтажі. З'ясовано, що характеристики оциліндрувальних верстатів і стаціонарних верстатів для нарізання вінцевої чашки підтверджують важливість точності обробки деревини для забезпечення високої якості готових конструкцій. Це впливає на стабільність та довговічність дерев'яних будівель. Встановлено, що традиційні зруби вирізняються натуральною довговічністю та виразною естетикою, проте вимагають значних трудозатрат і часу на усадку. OSB системи характеризуються швидкістю та стабільністю геометрії, оптимальні для енергоефективного домобудівництва, але залежать від чіткого заводського контролю й якості клеїв. Рекомендовано активно впроваджувати інноваційні технології та сучасне обладнання для виробництва дерев'яних будівельних матеріалів, таких як оциліндрувальні та стаціонарні верстати. Це дозволить підвищити точність виготовлення елементів, зменшити витрати на виробництво та покращити якість кінцевих виробів. Запропоновано для швидкого монтажу та високого ККД енергії найкраще підходять SIP-панелі, а якщо потрібна більша гнучкість у плануванні та економія на логістиці – класична каркасна технологія з OSB-обшивкою.

Ключові слова: дерев'яне будівництво, зруб, оциліндрова колода, профільований брус, каркасна технологія, сендвіч-будинок, плит OSB, клеєні конструкції, оциліндрувальні верстати, нарізка вінцевої чашки, деревопохідні матеріали, SIP-панелі.

Актуальність. Дерев'яне будівництво з кожним роком набирає популярності завдяки своїй екологічності, природним властивостям та енергоефективності [2, 6, 7, 10, 18, 73]. Як засвідчують тенденції обсягів заготівлі деревини [1, 19, 29, 35, 40, 42, 43, 44, 45, 69] в умовах глобальних змін клімату та збільшення вимог до сталого будівництва, деревина як матеріал набуває особливої актуальності. Використання дерев'яних конструкцій для зведення будинків дозволяє досягти високих показників теплоізоляції та знизити викиди CO₂. Сучасні технології, зокрема зведення зрубів та каркасних будинків за допомогою новітніх матеріалів, таких як OSB плити та клеєні конструкції [1, 9, 14, 16, 23, 24, 30, 39, 41, 55, 62, 63] є важливими для розвитку індустрії будівництва. Враховуючи тенденції до лісозаготівлі [20, 26, 33, 48, 52, 66], використання сучасних матеріалів і технологій, застосу-

¹ Гайда Сергій Володимирович – академік Лісівничої академії наук України, доктор технічних наук, професор кафедри технологій меблів і виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-238-45-04, +38-067-791-25-22. E-mail: serhiy.hayda@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7468-5661> ResearcherID: ABB-1636-2021 Scopus/authorID=57221587964

² Ференц Олег Богданович – канд. техн. наук, доцент, завідувач, кафедра технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: +38-067-945-01-24. E-mail: oleh.ferents@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4322-3952>

вання таких рішень дозволяє не лише полегшити будівництво, а й підвищити його довговічність та безпеку. У багатьох регіонах дерев'яне будівництво стало важливим напрямом в житловому будівництві, зокрема завдяки можливості швидкого та економічного зведення житла. Технологія каркасного будівництва з використанням деревинопохідних матеріалів [18, 31, 32, 34, 46, 53, 54, 58, 61, 67, 68] та вживаної деревини [4, 5, 7, 8, 18, 28, 37, 38, 51] дає можливість створювати енергоефективні та швидкобудуючі конструкції, що є важливим у контексті потреби в доступному житлі.

Проблемність. Оскільки деревина є органічним матеріалом, вона схильна до деформацій і впливу вологи, що потребує особливої уваги до технологій збереження її якості. Застосування новітніх технологій для обробки [3, 11, 15, 22, 27, 49, 59, 71, 72] та зберігання деревини, зокрема профільованого бруса та оциліндрованої колоди, є важливим завданням для забезпечення довговічності будівель. Враховуючи складність виготовлення таких матеріалів, як оциліндровані колоди чи профільовані бруси, необхідно постійно вдосконалювати виробничі процеси. Від якості обробки деревини, зокрема використання оциліндрувальних верстатів та стаціонарних верстатів для нарізання вінцевих чашок, залежить кінцевий результат будівництва. Всі ці фактори безпосередньо впливають на якість конструкцій і їх довговічність. При застосуванні каркасних технологій важливим аспектом є вибір матеріалів для утеплення, що впливає на енергетичні характеристики будинку. Плити OSB та інші деревинопохідні матеріали повинні відповідати високим вимогам щодо теплоізоляції та вологостійкості, що потребує серйозних досліджень та впровадження нових стандартів. Існує потреба в удосконаленні нормативно-правової бази для дерев'яного будівництва [64, 65], адже технології постійно змінюються, а вимоги до будівельних норм можуть не завжди встигати за новими інноваціями. Тому виникає проблема регулювання безпеки, зокрема для каркасних та зрубових будинків, щоб забезпечити їх відповідність стандартам безпеки під час застосування конструкційних щитових матеріалів з відповідними властивостями [12, 13, 17, 21, 25, 36, 47, 50, 56, 57, 60, 69, 70].

Аналіз перерізів деревини для зведення зрубів. Історія дерев'яного будинкобудування є досить великою, оскільки людство виготовляло їх з давніх давен. У наш час дерев'яне будинкобудування у світовому масштабі розвивається двома шляхами. Перший – це зведення зрубів з оциліндрованої колоди або профільованого бруса (рис. 1, табл. 1). Другий – монтаж будинків типу «сендвіч» за каркасною технологією з деревинопохідних матеріалів, наприклад, плит OSB в поєднанні з різними клеєними конструкціями.

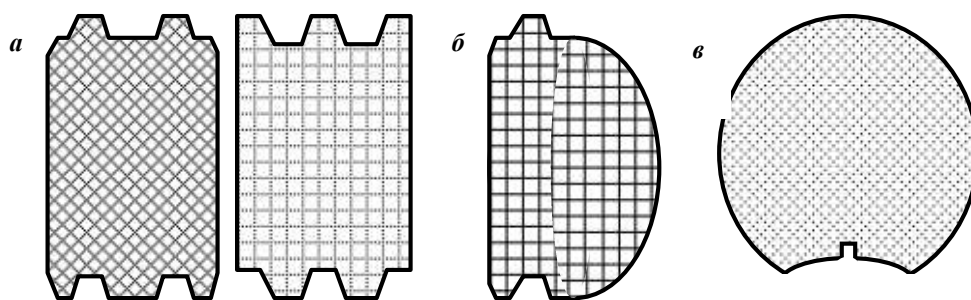


Рис. 1. Поперечні перерізи деревини для зведення зрубів:

- а – профільовані бруси;
- б – профільований брус з напівкруглим боком;
- в – оциліндрована колода з компенсаційним пазом

Будинки з натуральної деревини – це елітні та престижні споруди. Адже дерево оздоровлює людину, оскільки, в рубленій хаті, відносна вологість повітря найбільш сприятлива для організму (близько 50 %). Але, крім сприятливого внутрішнього мікроклімату, у рубленому будинку ще й дуже тепло, у порівнянні з цегляним цих же розмірів. Він тепліший і від, вище згаданого, американського аналога типу «сендвіч», будівництво яких поширене в Канаді та США. Згідно результатів досліджень Національного бюро стандартизації США було виявлено, що електроенергії, яка затрачалася на кондиціювання будинку з натурального дерева протягом трьох літніх місяців, було витрачено на 24 % менше у порівнянні з будинком типу «сендвіч», а споживання її у будинку-зрубі протягом року — приблизно на 45 % менше.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика поперечні перерізів деревини для зведення зрубів

Тип бруса	Розміри (мм)	Форма	Монтаж та ущільнення	Переваги	Недоліки
Оциліндрований брус	Ø 180 – 260	Круглий із фаскою для шип-паза (чаша)	Шип-паз по центру; ущільнювач між рядами	Мінімальна усадка; естетика «під рубане»; швидкий монтаж	Менша площа прилягання; потребує ущільнення
Ручний рублений брус	200×200; 220×220; 240×240	Прямокутний із «чашкою» (V-шип)	V-шип на торцях; герметизація джутом	Традиційний вигляд; гарний теплообмін	Велика усадка; потребує витримки часу
Профільований брус (цільний)	150×150; 180×180; 200×200; 200×220	Прямий профіль або «ластівчин хвіст»	Двосторонній шип-паз; ущільнювальна стрічка	Щільніше прилягання; менша усадка; простіший монтаж	Вища вартість обробки; менша міцність по волокнах
Клеєний брус	180×200; 200×200; 200×220; 200×240	Прямокутний, ламелі 34–45 мм	Шип-паз або плоске прилягання; герметична кам. стрічка	Стабільний розмір; мінімальна усадка; висока міцність	Найвища вартість; потребує фабричного виробництва
Півколоди (півбрус)	товщина 50–80, ширина 150–200	Півкруглий	Клейонка до каркаса; монтаж як облицювання	Легкий монтаж; декоративний; додатковий утеплювач	Не несе конструктивного навантаження

Короткий опис кожного типу бруса або колоди:

1. Оциліндрований брус (оциліндрована колода). Діаметр: зазвичай 180–260 мм. Профіль: зовні круглий; внутрішній паз (чашка) дозволяє стикувати ряди. Переваги: невелика усадка (за рахунок точного фрезерування), швидкість монтажу, природний вигляд. Недоліки: погіршена теплоізоляція між рядами без якісного ущільнення; зменшена площа прилягання.

2. Ручний рублений брус: Розміри: 200×200 до 240×240 мм. Профіль: V-шип («чашка») на торцях; щільність прилягання – за рахунок сил ручної обробки. Переваги: класичний зовнішній вигляд «карпатського зруба», добра паропроникність. Недоліки: значна усадка (до 6 % довжини), потреба у витримці та повторному ущільненні.

3. Профільований цільний брус: Розміри: 150×150, 180×180, 200×200, 200×220 мм тощо. Профіль: заводський шип-паз, часто з компенсаційним пазом (ластівчин хвіст), що значно знижує продування. Переваги: менша усадка (2–3 %), висока швидкість зведення, краща герметичність. Недоліки: дорожчий, потребує точного зберігання параметрів вологості.

4. Клеєний брус: Розміри: переважно 180×200, 200×200, 200×240 мм. Конструкція: ламелі товщиною 34–45 мм склеюють у кілька шарів із перекресленим напрямком волокон. Переваги: майже відсутня усадка, висока міцність і стабільність форми, стабільні геометричні розміри. Недоліки: значно вища ціна, обмежені варіанти кольору та текстури («штучний» вигляд).

5. Півколоди (для личкування). Розміри: товщина 50–80 мм, ширина 150–200 мм. Призначення: декоративне оздоблення каркасних стін або внутрішня обробка. Переваги: легка вага, швидкість монтажу, створює ефект рубаного зрубу. Недоліки: не є несучим; потребує додаткової ізоляції.

Технології зведення дерев'яних будинків із оциліндрованих колод. Для зведення сучасного зрубу найбільше використовують оциліндровані колоди діаметром 180...200 мм, які за теплоізоляційними властивостями не поступаються цегляним стінам товщиною 38 см. Якщо колоди поступають з імпортного матеріалу, наприклад, фінської сосни з підігнаними на заводі вузлами і, тим більше, з обробленням антисептичними матеріалами, то вартість одного квадратного метра житла елітних проектів може сягати 600...800 \$ США. У даному випадку на вартість колод впливає вартість дорогого імпортного обладнання. Наприклад, вартість шведського заводу «Чедер» з виготовлення оциліндрованих колод становить близько 230 тис. \$ США. Найбільш прославились на українському ринку кілька фірм, що займаються спорудженням дерев'яних будинків (зрубів). Серед них такі: «УкрРесурс Експорт», «Ясень», «Граджа», «Г.А.А. Збірні будинки», «Луїдор», «Експрес-котедж», «Кортеж», «Mizoni Trade Hauze» та ін.

У зв'язку з цим, набагато менша собівартість одного квадратного метра зрубу з оциліндрованої колоди у разі виготовлення її українськими фрезерними верстатами безпосередньо на місці заготівлі (близько 400 \$ США). В Україні обладнанням для оциліндрування колод займається кілька фірм: «Астра», «Будпостач сервіс», «Днепро», «Інструментал», «ЛІС і К», «МАГР», «Прімекс», «РоМарія», «Сапсан», «Стефанюк О.О.», «Центр технологій деревообробки» та ін. Але найбільшого успіху в цьому напрямку досягли такі фірми як «ЛІС і К» та «МАГР» (рис. 2), які розробили високопродуктивні верстати для оциліндрування колод та представляли їх на останній спеціалізованій виставці в Україні. Технічні характеристики даних верстатів представлені у табл. 2.

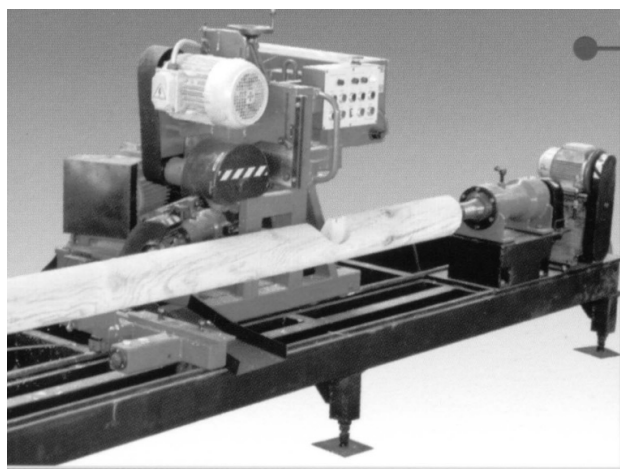


Рис. 2. Верстат для оциліндрування колод фірми «МАГР» моделі СЦ-6,5

Крім цього, ці фірми розробили стаціонарні верстати для нарізання вінцевої чашки (табл. 3). Наприклад, фірма «ЛІС і К» розробила чашко-нарізний верстат моделі ФСТ, який, крім того, свердлить отвори під нагелі, торцює та відрізає колоди на рівні частини. Стаціонарний верстат фірми «Магр» призначений для

великих обсягів виробництв. Він обладнаний універсальною фрезою, яка нарізає чашку під будь-яким кутом, а на колоді довжиною 500 мм — тільки під прямим кутом. Його продуктивність та якість оброблення значно вищі від переносного верстату марки УНВЧ-200-0 з його лобзиковою пилою (рис. 3). Останній з цією метою використовується безпосередньо на місці збирання будинків.

Таблиця 2. Характеристики оциліндрувальних верстатів

№ п/п	Показники	Моделі фірм	
		ЛЕС і К	МАГР
		СО-600	СЦ-6,5
1.	Діаметр колоди, яка обробляється, мм	До 300	До 300
2.	Діаметр обробленої колоди, мм	180...240	160...280
3.	Найменша довжина колоди, мм	Не регламентується	
4.	Найбільша довжина колоди, мм	6200	6500
5.	Швидкість подачі, м/хв	2,25	0,27...12,3
6.	Регулювання швидкості подачі	-	Безступеневе
7.	Частота обертання колоди, об/хв	30	16...100
8.	Регулювання швидкості обертання колоди	-	Безступеневе
9.	Загальна потужність двигунів, кВт	40,8	14,9
10.	Частота обертання інструменту, об/хв	4500	4200
11.	Габаритні розміри, мм		
	— довжина	18000	8150
	— ширина	1850	1350
	— висота	2200	1520
12.	Маса, кг	1750	1230
13.	Ціна, у. о.	7300	11000

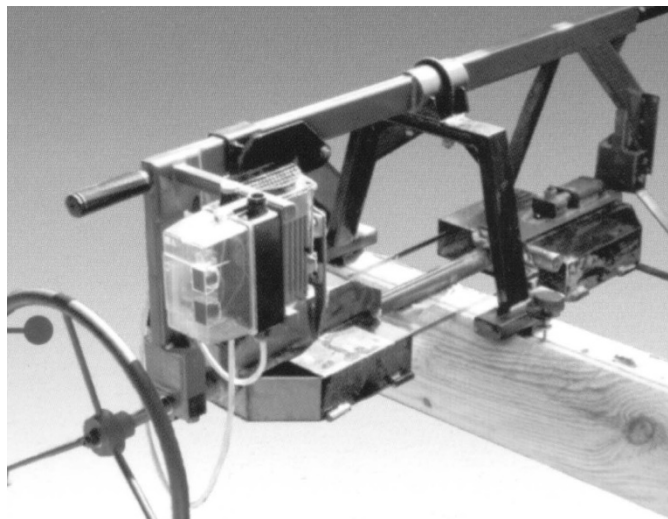


Рис. 3. Переносний верстат марки УНВЧ-200-0 з лобзиковою пилою для нарізання вінцевої чашки «МАГР»

Цікаве та оригінальне виготовлення дерев'яних будинків із профільованого бруса. Сьогодні на ринку пропонується два його види: перший — з поперечними розмірами 140 × 140 мм, що має пази по всій довжині для стикування в монолітну стіну за допомогою планок; другий — з поперечними розмірами 260 × 260 мм з напівкруглими боками, що нагадують ззовні колоди, для з'єднання між собою також в паз та гребінь. Для надійного та остаточного зрощення в монолітну стіну при монтажі будинку використовують будівельну пінку та дубові нагелі. Вартість

виготовлення профільованого бруса у порівнянні з вартістю оциліндрованої колоди приблизно на 25 % менша, а вартість одного метра готового будинку буде коштувати 250...350 \$ США в залежності географії розміщення замовлення.

Таблиця 3. Характеристики верстатів для нарізання вінцевої чашки

№ п/п	Показники	Моделі фірм	
		ЛЕС і К	МАГР
		ФСТ	СНВЧ
1	Діаметр оциліндрованих колод, мм	180...300	160...240
2	Найменша довжина колоди, мм	Не регл.	500
3	Найбільша довжина колоди, мм	6200	6500
4	Кут нарізання, град	90°...45°	90°...45°
5	Кут повороту інструменту, град	+ 30°, - 30°	+ 45°, - 45°
6	Швидкість подачі інструмента, м/хв	2,25	0,27...12,3
7	Регулювання швидкості подачі	Безступеневе	
8	Загальна потужність двигунів, кВт	20,0	5,9
9	Габаритні розміри, мм		
	— довжина	13420	9135
	— ширина	3100	2220
	— висота	2340	1820
10	Маса, кг	1050	1500
11	Ціна, у. о.	8100	6300

Особливого прогресу з виготовлення профільованого бруса з усіма замками (гніздами, зарізами, пазами та шипами), досягнула фірма «Hundegger», яка розробила технологічне устаткування з ЧПУ (лінію К-2) та повністю автоматизувала технологічні процеси для виготовлення практично всіх конструктивних елементів (крокв, лат, стояків та ін.) для сучасного будинкобудування.

Запропоноване фірмою «Hundegger» необхідне програмне забезпечення, в даний момент є одним із найкращих, і дає можливість виготовляти елементи більше ніж для 20-ти різновидів будинків. Серед чотирибічних верстатів на українському ринку для одержання профільованого бруса найбільш відомі моделі фірм: «Weinig» (Profimat, Unimat, Hydromat), «Ясень» (С-20), «Магр» (СПБ-6,5), «МАІ» (SFP-4A) та ін. Порівнюючи ціни різних дерев'яних будинків з цегляними, бачимо, що вони не поступаються їм за вартістю 1 м², але водночас володіють більшою теплоізоляцією, створюючи здоровий внутрішній мікроклімат.

Технології зведення дерев'яних будинків із використанням OSB-плит. Інший варіант дерев'яного будинкобудування — це заміна натуральної деревини на аналогічний дешевший конструкційний замінник. Найкраще для цих цілей підходить замінник фанери — плита OSB. Плита OSB — «структурно орієнтована плита» (Oriented Strand Board) є перспективним плитним матеріалом і представляє собою три-, чотири- або п'ятишарову деревну плиту розміром 2440x7320/2440x4880 мм (американський стандарт), 2500x5000/2500x7500 мм (європейський стандарт) або 2745x7320/3600x7320 мм (японський стандарт). Плита OSB виготовляється таких товщин (мм). 6; 8; 10; 12; 15; 18; 22; 25, а за спеціальним замовленням навіть 38 мм. У них кожний прошарок орієнтований в одному напрямку і має чітко визначений розмір крупнорозмірної стружки.

Завдяки різноманітній орієнтації та товщині кожного з прошарків є можливість створення кінцевого продукту з властивостями, що важко досягти в інших композиційних матеріалах. Продуктом — джерелом для OSB була американська плита Waterboard, що застосовується в будівництві вже 35 років та була описана в усіх американських і канадських правилах та будівельних стандартах.

Основні технології зведення дерев'яних будинків із використанням OSB-панелей можна класифікувати за конструктивними схемами та способами застосування плит (табл. 4).

Таблиця 4. Характеристика технологій та конструктивних схем

Характеристика технологій :переваги та недоліки		
Технологія	Опис	Компоненти конструкції
Каркасна (platform framing)	Стандартний дерев'яний каркас із вертикальних стояків; OSB-панелі кріпляться зовні	Рамкові стійки (брус 38×140...50×200 мм)
Низька вага	Потребує точного ущільнення стиків	OSB 10–12 мм як зовнішня обшивка
Мінімальні втрати матеріалу	Кріплення потребує досвіду	Утеплювач (мінеральна вата, ековата)
Швидкий монтаж		Паро- та вітробар'єр
		Фасадне оздоблення
SIP-панелі	Заводські сендвіч-панелі: дві OSB-плити з внутрішнім шаром утеплювача	OSB 12–16 мм зовнішні шари
Висока енергоефективність	Мінімальна усадка	Пінополістирол або PUR 100–200 мм в середині
Швидкий «коробковий» монтаж	Велика вага на окремих елементах	Фальцеві замки або шип-паз
Висока вартість	Потребує спецтранспорту	
Панельні (фабричні стінові щити)	Великогабаритні заводські щити каркас-OSB-утеплювач-OSB, що збираються на майданчику	Брус обв'язки й стояків
Якість заводської герметизації	Обмеження розмірів щитів під транспорт	Точність геометрії
Швидкість на майданчику	Висока логістика й монтажна техніка	Пінополістирол /мінеральна вата 150–200 мм між плитами
		Кріплення гвинтами та куточками
Каркасно-щитовий (з вбудованою OSB)	Комбінований: збірка каркасу + місцева нарізка й обшивка OSB прямо на будмайданчику	Аналогічно до каркасної, але OSB нарізають на місці
Мінімальні перевезення	Повільніше ніж SIP	Додаткові ребра жорсткості
Можливість доробок на будмайданчику	Гнучкість в плануванні	Локальні монтажні порожнини для інженерії

Загальні етапи монтажу для каркасної технології наступний:

1. Підготовка фундаменту: Стрічковий, пальовий чи плитний фундамент; Встановлення цокольного бруса з антисептиком.
2. Зведення каркасу: монтаж нижньої обв'язки (брус 50×150...50×200 мм; Вертикальні стійки через крок 600 мм (звичайний); Встановлення верхньої обв'язки.

3. Обшивка OSB-панелями: Кріплення OSB-панелей зовні (гвинти через 150–200 мм); Ущільнення стиків герметичною стрічкою або монтажним скотчем; Перевірка геометрії та вертикальності.

4. Утеплення і бар'єри: Засипка або монтаж плити утеплювача між стійками; Пароізоляція з внутрішньої сторони, вітробар'єр зовні; Монтаж контробрешітки для вентиляції.

5. Зовнішнє та внутрішнє оздоблення: Фасадні панелі, сайдинг, штукатурка. Внутрішня обшивка гіпсокартоном або вагонкою.

Наприклад, будинки збудовані за каркасною технологією з використанням плит OSB являються: екологічними, енергозберігаючими, дешевими в будівництві й експлуатації, споруджуються за декілька тижнів.



Рис. 4. Фрагменти використання плити OSB при спорудженні будинків

Швидке будівництво не означає, що ці будинки є менш стійкими, а навпаки. Завдяки перевагам плит OSB будинки одно- та багатосімейні каркасної конструкції будуються швидше, вони дешевші, а споруджуючи їх досконалим способом, можуть протриматися багато років. Будинок із такою конструкцією витримує навіть сильні землетруси — він вигинається, але не ламається (згідно проведених досліджень у США, виявлено, що землетруси у Каліфорнії та Японії показали, що стінові конструкції будинків каркасного типу, у яких для обшивки використані плити OSB, виявилися набагато стійкішими, ніж стіни, побудовані з цегли та бетону). Якщо підлоги, стіни і стовпи каркасних будинків правильно ущільнені, то такі будинки можна обігрівати ощадливим способом. Особливості роботи з OSB: для несучих стін — OSB-3 (вологостійка, клас використання CU3); для дахів — OSB-2 достатньо в сухому кліматі; OSB критично боїться тривалого намокання — всі стики й торці повинні бути герметично закриті; гвинти або цвяхи не далі ніж 150–200 мм уздовж ребер жорсткості, по периметру — до 100 мм; між OSB і зовнішнім облицюванням має бути вентиляований зазор 20–40 мм.

Порівняльний аналіз. Порівняльний аналіз двох альтернативних технологій дерев'яного будинкобудування базується на описі їх технологічних особливостях із зазначенням переваг та недоліків, зокрема:

1. Технологія зведення зрубів із різних поперечних перерізів деревини. Класифікація матеріалів: профільований брус (150×150...200×200 мм), профільований брус з напівкруглим боком ($R = 20...30$ мм), оциліндрована колода з компенсаційним пазом (діаметр 200–300 мм). **Обладнання:** мобільні оциліндрувальні верстати (15–22 квт, 10–15 м³/год, до 6 м довжини); стаціонарні ЧПУ-верстати для нарізання вінцевої чашки (точність $\pm 0,5$ мм, 30–50 чашок/год). **Переваги:** натуральність та довговічність: масивні стіни у 200–300 мм гарантують експлуатацію понад 100 років; природна паропроникність: сприятлива мікрокліматична регуляція в приміщенні; естетика: виразний малюнок деревини з напі-

вкруглим боком створює → натуральний «рухомий» фасад. **Недоліки:** усадка та деформації: до 5–8 % за перший рік, потребують ущільнення джутом/паклею і періодичної підгонки; трудомісткість монтажу: одна бригада здатна змонтувати до 40–50 м² стін/доба; кліматозалежність: необхідність вентиляції й додаткового захисту від надмірної вологи.

2. Технологія монтажу будинків із деревопохідних матеріалів (OSB-панелей). Конструктивні схеми: каркасно-панельні системи на клеєному брусі (GL 24h) з OSB-2/3 (12–18 мм); сендвіч-панелі (OSB + ізоляція 150–200 мм + OSB). **Методи кріплення:** гвинтові стики (крок 150 мм), степлерна тимчасова фіксація, замкові пази на торцях. **Переваги:** швидкість монтажу: до 100 м² стін/доба однією бригадою; стабільність геометрії: мінімальна усадка (< 1 %), відсутність великих деформацій; універсальність інженерії: інтегровані канали під електрику, вентиляцію, простота утеплення. **Недоліки:** залежність від точності виробництва: будь-які відхилення на фабриці призводять до неточностей монтажу; обмежена «дихаюча здатність» порівняно з масивом — потреба у пароізоляції; високі вимоги до клеїв і захисту від вологи: PUR-склеювання повинно проводитися за суворих умов вологості та температури.

Європейський досвід. Альтернативними новинками в галузі дерев'яного будинкобудування є розробки європейських фірм, які були представлені на останніх виставках, зокрема на виставці «LIGNA+2023». Там були продемонстровані сучасні досягнення у виробництві клеєних конструкцій для будівництва з використанням деревини, сталі та залізобетону. Наприклад, приватна німецька фірма w+d Holzsystem Schuh (www.hightech-traeger.com) запропонувала захищені європейським патентом 0038830 балки зі сталеву поперечиною, які виготовлені з деревини шпилькових порід відповідно до класу S10 німецького стандарту DIN-1071 частина 1 (рис. 5).

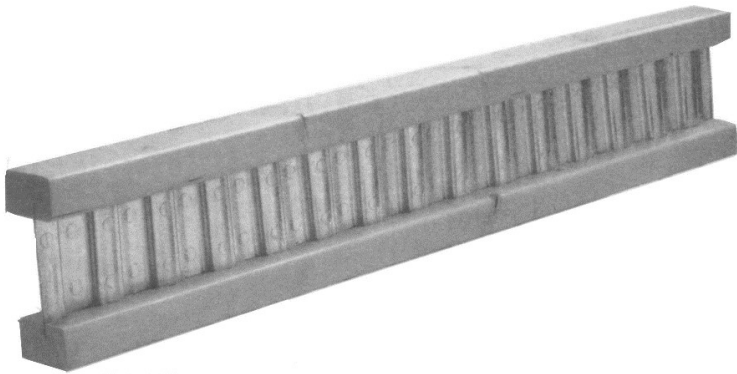


Рис. 5. Будівельна балка із сталлю поперечиною

Дані конструкції одержали в Німеччині «путівку в життя» в Інституті будівельної техніки в Берліні. У якості основи застосовується стругана ламель вологістю 15...18 %, за бажанням споживача просочена захисними сумішами проти комах і грибків.

Поперечина - спеціальна тверда оцинкована сталь товщиною 0,5 мм із ребрами жорсткості. Для естетичного ефекту поперечина фарбується. У балці можливо використання однієї або двох поперечин. Вага балки 4...15 кг/м, висота 0,21...0,55 м, а довжина від 6 до 20 м. Універсальні можливості з'єднання будівельних дерев'яних елементів надає розробка німецької фірми INDUO Systemholztechnik (www.induo.de або www.induohaus.de). Дуже простий кріпильний сердечник для будівельних конструкційних матеріалів дерево-дерево, дерево-сталь і дерево-залізобетон запропонувала німецька фірма INDUO Systemholztechnik (рис. 5).

Для монтажу з'єднання можливе застосування сучасних автоматизованих технологічних процесів. Конструкція відрізняється простотою у використанні, ви-

сокою технологічністю, надійністю кріплення та економією матеріалів. Поданий елемент дозволяє просто і надійно встановлювати брус і балки, економлячи час на процесі монтажу. Підвищені якості сервісу доповнюються невидимістю сполучного елемента для користувача.

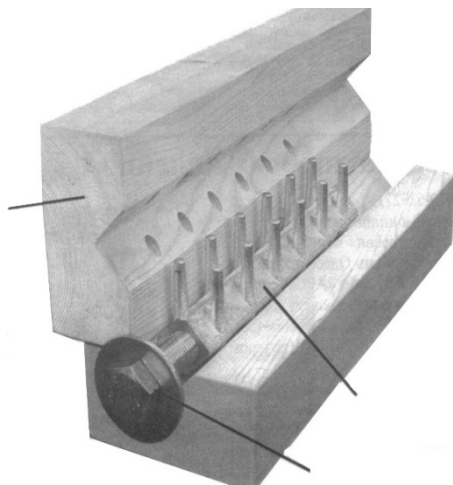
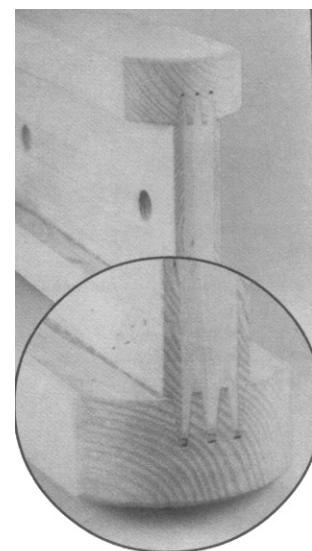


Рис. 6. Конструкція будівельної конструкційної балки «Induo»

Суть новаторської пропозиції із Швейцарського федерального інституту технології в Лозанні, полягає у використанні балок склеєних за технологією Purbondo з вставкою прошарків із вертикальним розташуванням клеєних елементів у конструкціях, які підлягають найбільшому інтенсивному розтягу і вигину. Перерозподіл навантаження на вертикальну частину склейки збільшує поперечну жорсткість балки і підвищує її стійкість до навантажень не менше ніж на 10 %. Технологія дозволяє створювати дуже міцні будівельні конструкції і заощаджувати 15...30 % деревини в порівнянні зі звичайними балками без підвищення термінів виготовлення. Додатковими перевагами пропозиції є зниження товщини застосовуваних у будівництві елементів і економія енергії на їхнє виготовлення. Інше приватне підприємство з австрійського Тіролю Pfeifer Holzindustrie Gmb & 3. KG (www.Holz-pfeifer.com), яке широко відомо в Європі своїми клеєними конструкціями, розробило спеціальні будівельні балки Н-20 (рис. 7).



Зручна, легка і стабільна дерев'яна конструкція довжиною до 12 метрів дозволяє активно використовувати їх у широкому діапазоні, зокрема у дерев'яному будинкобудуванні. Клеєний вертикальний елемент і двостороннє шипове з'єднання гарантує високу міцність і надійність.

Рис. 7. Конструкція будівельної балки Н-20

Отже, кожна людина з середнім достатком, виходячи із своїх фінансових можливостей, може збудувати, виходячи із останніх досягнень галузі дерев'яного будинкобудування, або купити будь-яку, з вище охарактеризованих, дерев'яних осель, які забезпечують здоровий мікроклімат та відпочинок.

Висновки:

1. Обґрунтовано, що технології дерев'яного будівництва продовжують розвиватися, і дерев'яні будинки набирають популярності завдяки своїй екологічності, енергоефективності та натуральному вигляду. Це робить деревину одним з найбільш затребуваних матеріалів для зведення житла.
2. Проаналізовано два основні підходи до будівництва дерев'яних будинків: традиційні зруби з оциліндрованої колоди чи профільованого бруса та сучасна каркасна технологія, яка дозволяє створювати будинки типу «сендвіч». Кожен підхід має свої переваги, залежно від потреб замовника, енергетичних вимог та бюджету.
3. Описані різні типи поперечних перерізів деревини для зведення зрубів, зокрема профільовані бруси з напівкруглим боком та оциліндровані колоди з компенсаційним пазом. Ці технології забезпечують високу міцність конструкцій і зручність у монтажі.

4. З'ясовано, що характеристики оциліндрувальних верстатів і стаціонарних верстатів для нарізання вінцевої чашки підтверджують важливість точності обробки деревини для забезпечення високої якості готових конструкцій. Це впливає на стабільність та довговічність дерев'яних будівель. Встановлено, що традиційні зруби вирізняються натуральною довговічністю та виразною естетикою, проте вимагають значних трудозатрат і часу на усадку. OSB системи характеризуються швидкістю та стабільністю геометрії, оптимальні для енергоефективного домобудівництва, але залежать від чіткого заводського контролю й якості клеїв.

Рекомендації:

1. Рекомендовано активно впроваджувати інноваційні технології та сучасне обладнання для виробництва дерев'яних будівельних матеріалів, таких як оциліндрувальні та стаціонарні верстати. Це дозволить підвищити точність виготовлення елементів, зменшити витрати на виробництво та покращити якість кінцевих виробів.

2. Для досягнення максимальної якості та ефективності при зведенні дерев'яних будинків, важливо проводити навчання фахівців, що працюють з новими технологіями, а також постійно оновлювати їх кваліфікацію для роботи з сучасним обладнанням та матеріалами.

3. Залежно від умов експлуатації та вимог до енергозбереження, необхідно ретельно підходити до вибору матеріалів для зведення дерев'яних будинків. Для забезпечення довговічності та збереження енергії, варто використовувати сучасні матеріали, такі як плит OSB та клеєні конструкції, у поєднанні з традиційними зрубами. Враховуючи поширення нових технологій, слід удосконалювати будівельні норми і стандарти для дерев'яного будівництва, щоб забезпечити відповідність сучасним вимогам безпеки, енергоефективності та екологічності.

4. Для швидкого монтажу та високого ККД енергії найкраще підходять SIP-панелі. Якщо потрібна більша гнучкість у плануванні та економія на логістиці – класична каркасна технологія з OSB-обшивкою. Для максимальної точності розмірів і заводської якості необхідно використовувати панельні щити.

References

1. **European Panel Federation.** <https://europanel.org/press-release-epf-agm-2024>
2. **Gayda S.V.** (2003). Modern technologies of wooden house construction. Woodbusiness 4: 33-44 (in Ukrainian).
3. **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>
4. **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 June 23-26. 2013). TU Zvolen, 119-130.
5. **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).
6. **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.
7. **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>
8. **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>
9. **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.
10. **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.
11. **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).

12. **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.
13. **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>
14. **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.
15. **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>
16. **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>.
17. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). *Bulletin of KhNTUA* 197:3-9, (in Ukrainian).
18. **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).
19. **Gayda S.V.** (2023). State and analysis of the dynamics indicators of the production volume of the woodworking and furniture industry. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 4-19 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234901>
20. **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>
21. **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>
22. **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>.
23. **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>.
24. **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>
25. **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>.
26. **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>
27. **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>
28. **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>
29. **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>
30. **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.
31. **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>

32. **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>
33. **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>
34. **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>
35. **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>
36. **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>
37. **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>
38. **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>
39. **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>
40. **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>.
41. **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).
42. **State Statistics Service of Ukraine.** <https://www.ukrstat.gov.ua>
43. **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>
44. **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>
45. **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>
46. **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>
47. **Гайда С.В.** Встановлення показника циркулярності в лісовому секторі: матеріали тез XIV МН-ПК (23–24.05.2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.2. – С. 192-194.
48. **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>
49. **Гайда С.В.** Основи створення гнучких виробничих систем. Гнучкі автоматизовані виробництва та робототехніка в деревообробці: Ч.1. – Львів: ЦНТЕІ, 1998. – 149 с.
50. **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>
51. **Гайда С.В.** Технології вживаної деревини як дієві механізми для реалізації принципів циркулярної економіки: матеріали тез НПК (05-06.06.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 137-139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17079555>

52. Гайда С.В., Гузь М.М., Никитюк Л.О. Корневая древесина-источник дополнительного сырья для плитного производства. Тези НТК (21-25.09.92). Архангельск:ЦНИИМОД. – С.88-89.
53. Гайда С.В., Лесів Л.Е. Міцність комбінованих столярних плит із вживаної деревини ялиці: матеріали тез Н-ПК (24-25.05.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 128-130. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
54. 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>
55. 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.
56. Гайда С.В., Медвідь Л.В. Дослідження міцності при статичному згині столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез Н-ПК (7-8.10.2024 р.). – Харків : ДБТУ, 2024. – С. 193-195. <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/conf-07-08-10-24-mater.pdf>
57. 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.
58. 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>
59. 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>
60. Гайда С.В., Подібка Т.І. Формостійкість меблевих щитів із сосни звичайної: матеріали тез XIV МН-ПК (23–24.05.2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 211-212.
61. Гайда С.В., Удовиський 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/>
62. Гайда, С.В. Прогресивні плитні матеріали MDF та OSB. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 1 – С. 30-32.
63. Гайда, С.В. Що нам важко стілець зробити? Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 3 – С. 44-52.
64. ДБН В.2.6-161:2017. Дерев'яні конструкції. Основні положення. – К. : Мінрегіон України, 2017. – 117 с. – (ДБНУ).
65. ДСТУ-Н Б В.2.6-217:2016. Настанова з проектування будівельних конструкцій з цільної і клеєної деревини :– [Чинний з 2017-04-01]. – К. : Мінрегіон України, 2016. – 35 с. – (ДБНУ).
66. 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>
67. 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/>
68. 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>
69. 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>
70. 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/>
71. 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>
72. 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>

UDC 674-4

*Prof. S.V. Gayda, Doctor of Sciences;
assoc. prof. O.B. Ferents, PhD – UNFU*

Comparative analysis of alternative technologies of wooden building

It is substantiated that wooden construction technologies continue to develop, and wooden houses are gaining popularity due to their environmental friendliness, energy efficiency and natural appearance. This makes wood one of the most popular materials for building housing. Two main approaches to the construction of wooden houses are analyzed: traditional log houses made of rounded logs or profiled timber and modern frame technology, which allows you to create «sandwich» type houses. Each approach has its own advantages, depending on the needs of the customer, energy requirements and budget. Different types of wood cross-sections for the construction of log houses are described, in particular, profiled beams with a semicircular side and rounded logs with a compensation groove. These technologies provide high structural strength and ease of installation. It was found that the characteristics of rounding machines and stationary machines for cutting crown cups confirm the importance of precision wood processing to ensure high quality of finished structures. This affects the stability and durability of wooden buildings. It was found that traditional log houses are distinguished by natural durability and expressive aesthetics, but require significant labor and time for shrinkage. OSB systems are characterized by speed and stability of geometry, optimal for energy-efficient housebuilding, but depend on clear factory control and the quality of adhesives. It is recommended to actively introduce innovative technologies and modern equipment for the production of wooden building materials, such as rounding and stationary machines. This will increase the accuracy of manufacturing elements, reduce production costs and improve the quality of final products. It is proposed that SIP panels are best suited for quick installation and high energy efficiency, and if greater flexibility in planning and savings on logistics are required - classic frame technology with OSB sheathing.

Keywords: wooden construction, log house, round log, profiled beam, frame technology, sandwich house, OSB boards, glued structures, rounding machines, crown cup cutting, wood-based materials, SIP panels.



Аспірант Л.В. Медвідь¹ – НЛТУ України

СТВОРЕННЯ АЛГОРИТМУ ФОРМУВАННЯ ЕТАПІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ З ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАГОТОВОК ДЛЯ СТОЛЯРНИХ ПЛИТ ІЗ ВЖИВАНОЇ ДЕРЕВИНИ

Розглянуто проблему раціонального використання ВЖД шляхом створення алгоритму формування етапів технологічного процесу з виготовлення СП різних конструкцій, який ґрунтується на поетапному аналізі та моделюванні технологічних операцій. Запропоновано загальну структурну схему перероблення ВЖД, що охоплює всі основні технологічні ланки — від збирання матеріалу до формування готових плит, що дозволяє раціоналізувати виробничий процес і зменшити втрати матеріалу. Моделювання технологічних рішень довело ефективність поетапного підходу до перероблення ВЖД, особливо з урахуванням її різномірності, забруднення та пошкоджень. Обґрунтовано, що найбільш реальним і практично застосовним підходом до вирішення завдання сортування є аналіз (обсягів накопичення ВЖД для матеріального чи енергетичного використання), обсягів ВЖД за величиною забруднення (сортування за категоріями), обсягів ВЖД за розмірною придатністю (для одержання специфікаційних заготовок) та опис самої процедури прийняття поточних рішень про достатні обсяги ВЖД. Запропоновано способи поверхневого очищення ВЖД, зокрема, механізований спосіб за допомогою голкофрезерного інструменту. Виготовлення розмірно-придатних заготовок із ВЖД є ключовим етапом, що забезпечує стабільну якість готової столярної продукції та підвищує ефективність використання вторинної сировини. Розроблено типовий план цеху, у якому передбачено сортування ВЖД за чотирма категоріями, за видом матеріалу — масив, плита; видаленням металевих включень та інших забруднень. Основою цеху є верстати прохідного типу для здійснення операцій поверхневого поздовжнього очищення. Зокрема, для ВЖД-I використовується чотирибічний шліфувальний, для ВЖД-II — двобічношліфувальний, для ВЖД-III — двобічний голкофрезерний, для ВЖД-IV — чотирибічний голкофрезерний. Такий підхід сприяє оптимізації виробничих процесів, підвищенню ефективності перероблення матеріалу та зменшенню відходів деревини. Підготовлена за такими стадіями та рекомендаціями ВЖД є додатковою сировиною для виготовлення столярної плити та інших конструкційних матеріалів.

Ключові слова: вживана деревина, столярні плити, технологічний процес, алгоритм, перероблення деревини, моделювання, заготовки, сортування, розкрій, вторинна сировина.

Актуальність. Сучасні виклики у сфері деревообробної промисловості зумовлюють необхідність переходу до ресурсозберігаючих [29, 32, 36, 39, 41, 47, 52, 54, 64, 83, 87] та екологічно орієнтованих технологій. Потенційним ресурсом та невикористаною базою деревної сировини, запаси якої збільшуються в міру розвитку промисловості та господарства, в цілому, є запаси ВЖД [9, 10, 11, 13, 21, 25, 33, 39, 43, 51, 63]. Вирішення поставлених проблем ускладнюються різноманітністю ВЖД, наявністю металевих та інших включень, а також різних видів забруднювачів у ВЖД, яка за некоректного сортування та очищення, може спричинити значні відхилення результатів прогнозування властивостей [3, 15, 16, 24, 28, 37, 58, 71, 72, 76, 77, 82, 85] одержаної продукції від властивостей виробів, отриманих з первинної сировини, що є неприйнятним для споживачів. Одним із перспективних напрямів є використання ВЖД як сировини для виготовлення нових виробів [6, 14, 16, 33, 34, 50, 68, 78, 81, 84, 92, 93], зокрема столярних плит (СП). У контексті глобального зростання вартості деревини, обмеженості лісових ресу-

¹ Медвідь Любомир Володимирович — аспірант, кафедра технології меблів і виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103. м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-258-31-75, +38-093-494-50-13. E-mail: lyubomyr.medvid@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6654-9348>

рсів та актуальних вимог до зменшення обсягів відходів, перероблення ВЖД набуває особливої практичної цінності. Разом з тим, відсутність чітко сформованих технологічних алгоритмів, які б охоплювали всі етапи трансформації вживаного деревинного матеріалу у якісні столярні заготовки, стримує широке впровадження цієї ідеї у виробництво. Тому розроблення алгоритму формування етапів технологічного процесу з виготовлення СП із ВЖД [20, 21, 24, 26, 31, 40, 43, 67, 52, 54, 64, 83, 87] є своєчасним і важливим науково-практичним завданням.

Проблемність. Незважаючи на потенціал повторного використання деревини, на сьогодні відсутні уніфіковані підходи до оцінки [4, 5], сортування [1, 2] та технологічної підготовки вживаного матеріалу [25, 74, 89]. Основні проблеми включають: різномірність фізико-механічних властивостей ВЖД; високий рівень забруднення, дефектів і залишків старих покриттів; складність визначення придатності матеріалу до подальшої обробки; відсутність системного підходу до моделювання процесу виготовлення заготовок для СП різних конструкцій. Тобто, загальна проблема досліджень – відсутність ресурсощадних та екологічнобезпечних технологій [23, 44, 46, 48, 49, 59, 62, 63, 93] з практичними рекомендаціями щодо використання ВЖД в деревообробленні. Це зумовлює необхідність розроблення структурованого алгоритму, який би поєднував усі ключові технологічні етапи – від збирання й сортування [1, 2] до отримання якісних заготовок. Такий підхід дозволяє забезпечити стабільність якості кінцевого продукту, зменшити виробничі втрати та підвищити ефективність перероблення вживаних матеріалів.

Мета дослідження – розробити алгоритм формування етапів технологічного процесу з виготовлення СП із ВЖД шляхом моделювання логічної послідовності технологічних операцій перероблення та оптимізації підготовки заготовок для плит різних конструкцій. **Об’єкт дослідження** – технологічний процес перероблення ВЖД у столярні плити. **Предмет дослідження** – структура, логіка та послідовність технологічних операцій при формуванні заготовок із ВЖД для виготовлення СП. **Завдання дослідження:** Проаналізувати сучасні підходи до повторного використання деревини у виробництві столярних виробів. Визначити основні вимоги до технологічних операцій під час перероблення ВЖД. Розробити загальну структурну схему алгоритму технологічного процесу, що охоплює ключові етапи: збирання, накопичення, сортування, розкрій, очищення, підготовка заготовок. Моделювати логічну послідовність операцій з урахуванням якісних характеристик ВЖД. Обґрунтувати доцільність застосування запропонованого алгоритму для виготовлення СП різних конструкцій [24, 26, 31, 40, 43, 67, 52].

Аналіз літературних джерел. Проблематика повторного використання деревини у деревообробній промисловості дедалі більше привертає увагу науковців і практиків у контексті сталого розвитку, зменшення кількості відходів і дефіциту якісної деревинної сировини [22, 23, 39, 50, 56, 57, 60, 80, 81, 91]. У низці досліджень [29, 32, 36, 39, 41, 47, 52, 54] розглянуто можливості вторинного використання деревини з будівельних і меблевих відходів для виготовлення елементів нових виробів, зокрема ДСП [12, 13, 35, 50, 80], меблевих щитів [6, 17, 19, 27, 45, 75, 76, 77], клеєних брусів та облицювальних панелей. Дослідження вітчизняних та зарубіжних вчених із зазначеної проблеми стосуються, в основному, використання виробничих деревних відходів для палива [7, 8, 53, 54], без залучення ВЖД до процесу перероблення – виготовлення виробів з неї. Результати їхніх досліджень свідчать, що дана проблема не є повністю вирішеною, позаяк не розроблено нау-

кової бази та практичних рекомендацій для ефективних виробничих процесів з прогнозуванням властивостей продукції із ВЖД. У роботах [9, 10, 11, 13, 21, 25, 33, 39, 43, 51, 63] зазначено, що використання ВЖД супроводжується низкою технологічних труднощів, пов'язаних із різномірністю її фізико-механічних властивостей, залишками старих покриттів, елементами кріплення та значним зношенням структури волокон. Водночас автори підкреслюють потенціал цієї сировини за умови ефективного сортування, дефектації та адаптованої обробки.

Окремі дослідники [1, 2, 10, 14, 18, 25, 74] пропонують підходи до сортування і попереднього очищення ВЖД, проте вони здебільшого мають фрагментарний характер і не охоплюють усього ланцюга перетворення від забору матеріалу до отримання готової заготовки. Роботи [17, 75, 76, 77, 82, 84, 85, 88] фокусуються на технологіях розкрою та зрощування короткомірів, але без цілісного алгоритмічного узагальнення процесу. На сучасному етапі відчувається брак досліджень, які б системно моделювали увесь процес перетворення ВЖД на заготовки для СП — із чітким визначенням етапів, критеріїв придатності матеріалу, технологічної послідовності та типових рішень для плит різної конструкції. Це створює прогалину у науковому забезпеченні практики, яка вимагає універсальних і адаптивних алгоритмів для роботи з повторно використаною деревиною. Таким чином, актуальність і новизна цього дослідження полягає в тому, що воно комплексно вирішує завдання формування структурованого алгоритму перероблення ВЖД для потреб виготовлення СП, поєднуючи наукове моделювання з практично орієнтованими гнучкими технологічними рішеннями [1, 2, 30, 38, 55, 61, 65, 66, 70, 79, 86, 89, 93].

Результати досліджень.

Розроблення технологічної структурної схеми перероблення ВЖД на вироби. Загальна структурна схема алгоритму перероблення ВЖД на вироби містить у своєму складі такі основні логічні технології: збирання, накопичення, сортування, розкрій, очищення, виготовлення конструкційних виробів (рис. 1).

Покрокова процедура алгоритму матеріального перероблення ВЖД:

Крок 1. Збирання ВЖД за місцями походження: торгівельної мережі та послуг транспорту, будівництва, сировинних та деревообробних галузей, спожитих меблевих та інших виробів, деревинних муніципальних відходів, деревинних тпв та інших надходжень.

Крок 2. Первинне сортування з візуальним розподілом на складі за критеріями оцінки.

Крок 3. Розбирання та демонтаж складних конструкцій, наприклад: дахових сплетінь, альтанок, гідротехнічних споруд, арок, садово-паркових, віконних і дверних блоків та інших виробів з деревини з видаленням фурнітури, металевих та інших зовнішніх забруднень.

Крок 4. Сортування за забрудненням згідно з категорією ВЖД, сортування за призначенням, за специфікаційною придатністю, за майбутнім видом продукції і т. п.

Крок 5. Проводиться за потреби детальний аналіз ВЖД на токсичність, на радіонукліди, на забрудненість шкідливими та небезпечними речовинами. Крок 6. Здійснюється зовнішнє очищення від металевих включень із залучення до даної операції металодетекторів.

Крок 7. Розкрій масивної ВЖД проводиться за поперечно-повздовжньо-поперечною схемою. Спочатку проводиться відтинання торців, наприклад шипових кутових з'єднань, потім повздовжній розкрій на рейки, а тоді – розкрій на кратні заготовки за довжиною.

Крок 8. Поверхнєве очищення забруднених поверхонь деяких заготовок одним із способів, наприклад, голкофрезерним інструментом. Крок 9. Технологія виготовлення СП із ВЖД.

Крок 10. Перевірка одержаних СП із ВЖД за нормативними характеристиками.

Крок 11. Прийняття рішення про ефективність залучення ВЖД для матеріального використання, зокрема для виготовлення СП.

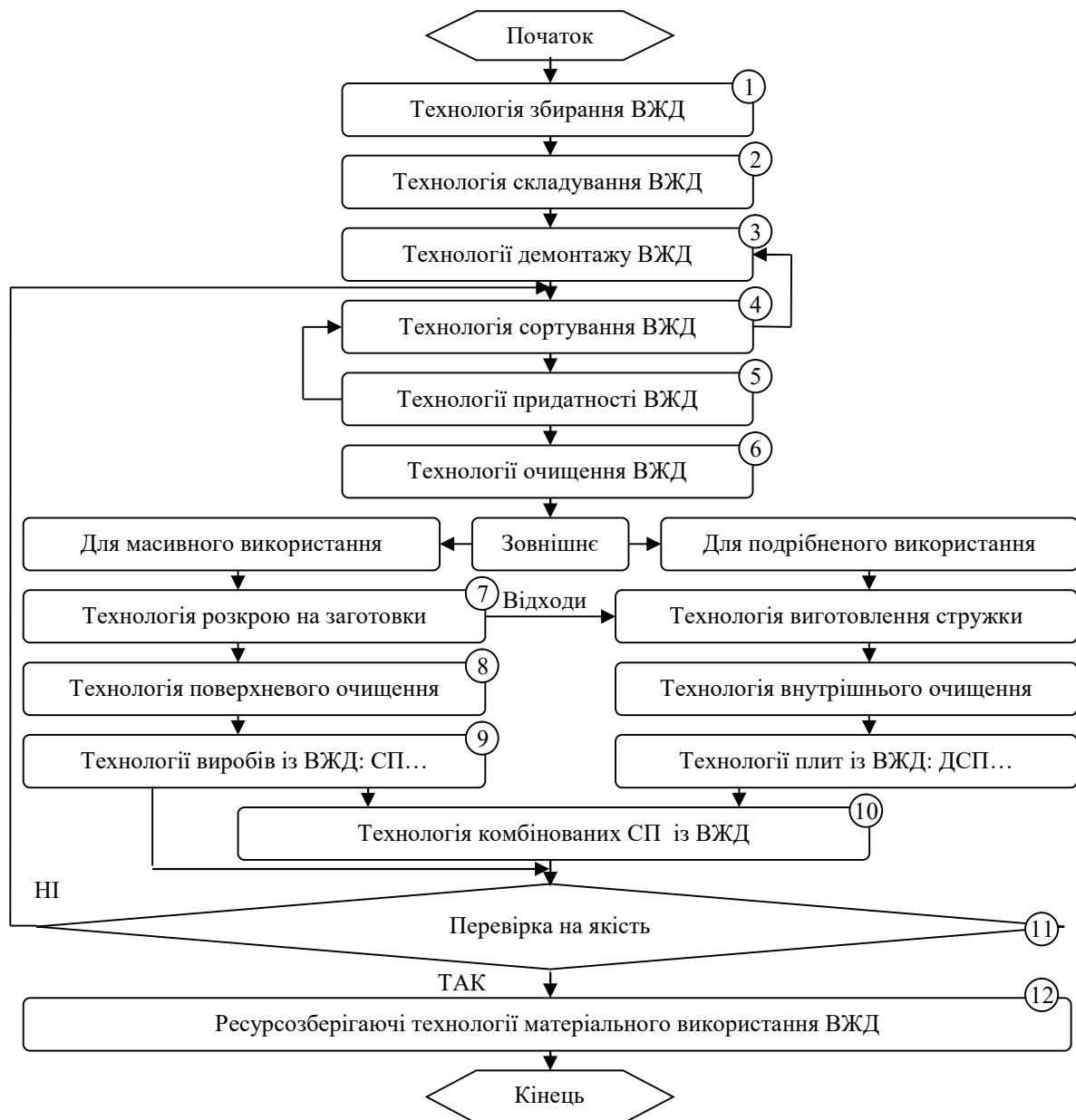


Рис. 1. Блок-схема технологічного алгоритму перетворення ВЖД на вироби

Структура підготовки ВЖД. Моделювання процесу підготовки ВЖД до перероблення містить наступні критерії оцінки ВЖД, які подано у табл. 1. Структурована технологія підготовки ВЖД охоплює такі технологічні процеси: сортування (за категоріями, за породою, за матеріалом, за вологістю, за токсичністю), очищення (вид, спосіб, метод, схема, якість) та розкрій (спосіб, вид, схема, вихід, специфікація) з використання відповідного устаткування.

Таблиця 1. Моделювання процесу підготовки ВЖД

Стадії підготовки	Критерії оцінки за			
	Походженням	Матеріалом	Видом	Типом
Ідентифікація	Вологістю	Токсичністю	Радіацією	Розміром
Сегрегація	Забрудненням	Призначенням	Матеріалом	Породою
Сортування	ВЖД-I	ВЖД-II	ВЖД-III	ВЖД-IV
Поділ на категорії	До виготовлення певного виду продукції			
Придатність	У подрібненому вигляді		У цілісному вигляді	
Використання	Зовнішнє	Поверхневе	Внутрішнє	Комплексне
Очищення	Тріска	Стружка	Поперечний	Повздовжній
Розкрій/подрібнення				

Розроблення правил сортування ВЖД та їх особливості процесу. Асортимент ВЖД є дуже широким, тому процес сортування є найбільш складним. Кінцева мета сортування –відбір придатної якісної ВЖД для виконання специфікаційного завдання. Складність полягає у тому, що немає попередньої інформації про характеристики зібраної насипом на складі ВЖД, оскільки таку інформацію можемо одержати вже безпосередньо перед її сортуванням. Завдання полягає у тому, щоб із відібраної ВЖД у майбутньому випилати заготовки та обробити їх на рейки для СП. Оператору-сортувальнику потрібно наперед з максимальною ймовірністю передбачати одержання відповідної кількості заготовок з розмірно-придатної ВЖД. Постановка задачі ускладнюється тим, що ВЖД вибираються випадково із накопичення її на складі і наперед невідомо, якого формату буде наступна ВЖД. Найбільш реальним і можливо єдиним на сьогодні практично застосовним підходом до вирішення описаної задачі є опис (поточного визначення) обсягів накопичення ВЖД для матеріального чи енергетичного використання, обсягів за величиною забруднення (сортування за категоріями), обсягів за розмірною придатністю (для одержання специфікацій них заготовок) і самої процедури прийняття поточних рішень про достатні обсяги ВЖД, що забезпечать одержання необхідної кількості якісних заготовок, методами теорії нечітких множин. Для моделювання процесу сортування на розмірно-придатну ВЖД вибрано режим роботи сортувального конвеєра, за якого проводиться сортування за категоріями та за матеріалом з наперед заданими їх обсягами за кожною придатною групою.

Основні припущення: вимоги до розмірно-придатних груп однакові; сортувальний конвеєр працює в нормальному режимі, на вході завжди є ВЖД, а в зонах накопичення відповідних груп завжди є місця для чергової одиниці ВЖД; під час роботи сортувального конвеєра постійно здійснюється облік обсягу отриманої ВЖД кожної розмірно-придатної групи; на конвеєр надходить ВЖД, яка перевірена на токсичність, на радіонукліди, на шкідливі вclusions, на наявність металевих включень, і яка може бути ідентифікована сканером, що визначає якість на даному етапі.

Під час формування правил використовували наступні твердження:

- зі збільшенням обсягу ВЖД для матеріального використання пріоритет ВЖД на сортування певної розмірно-придатної групи понижуватиметься;
- зі збільшенням обсягу якісної ВЖД (за величиною забруднення згідно з категоріями) пріоритет ВЖД на сортування певної розмірно-придатної групи понижуватиметься;
- зі збільшенням обсягу ВЖД за розмірною придатністю кожної категорії, починаючи від ВЖД-I, пріоритет ВЖД на сортування певної розмірно-придатної групи понижуватиметься;
- завжди відсортовуватиметься ВЖД з найвищим пріоритетом;
- пріоритет на сортування мають чисті ВЖД категорії ВЖД-I;
- пріоритет відсортованих в повному обсязі ВЖД буде дорівнювати нулю;
- великогабаритна ВЖД (наприклад, каркаси дахових конструкцій) має пріоритет над короткомірною, але розмірно-придатною ВЖД;
- у випадку, коли довжина ВЖД менша від розмірно-придатної для майбутнього виробу пріоритет заготовки дорівнює нулю.

Таким чином, під час надходження на сортування ВЖД, розроблена НЕС визначає пріоритет ВЖД на доцільність сортування ВЖД певної розмірно-придатної групи (за видом матеріалу) з конкретної категорії (ВЖД-I, ВЖД-II, ВЖД-III), щоб задовольнити в майбутньому розмірні специфікації виробів з деревини. Після визначення пріоритетів ВЖД на сортування приймається рішення про сортування ВЖД з найвищим пріоритетом. У підсумку, сукупність таких рішень для розмірно-придатної групи (за видом матеріалу) дозволить змоделювати технологічний процес сортування ВЖД та забезпечити виконання специфікації при розкрою. Суть у знаходженні таких її параметрів, які дозволять досягнути раціонального значення специфікаційного обсягу відсортованої ВЖД, що дозволить у майбутньому випилати заготовки відповідної специфікації (рис. 2).

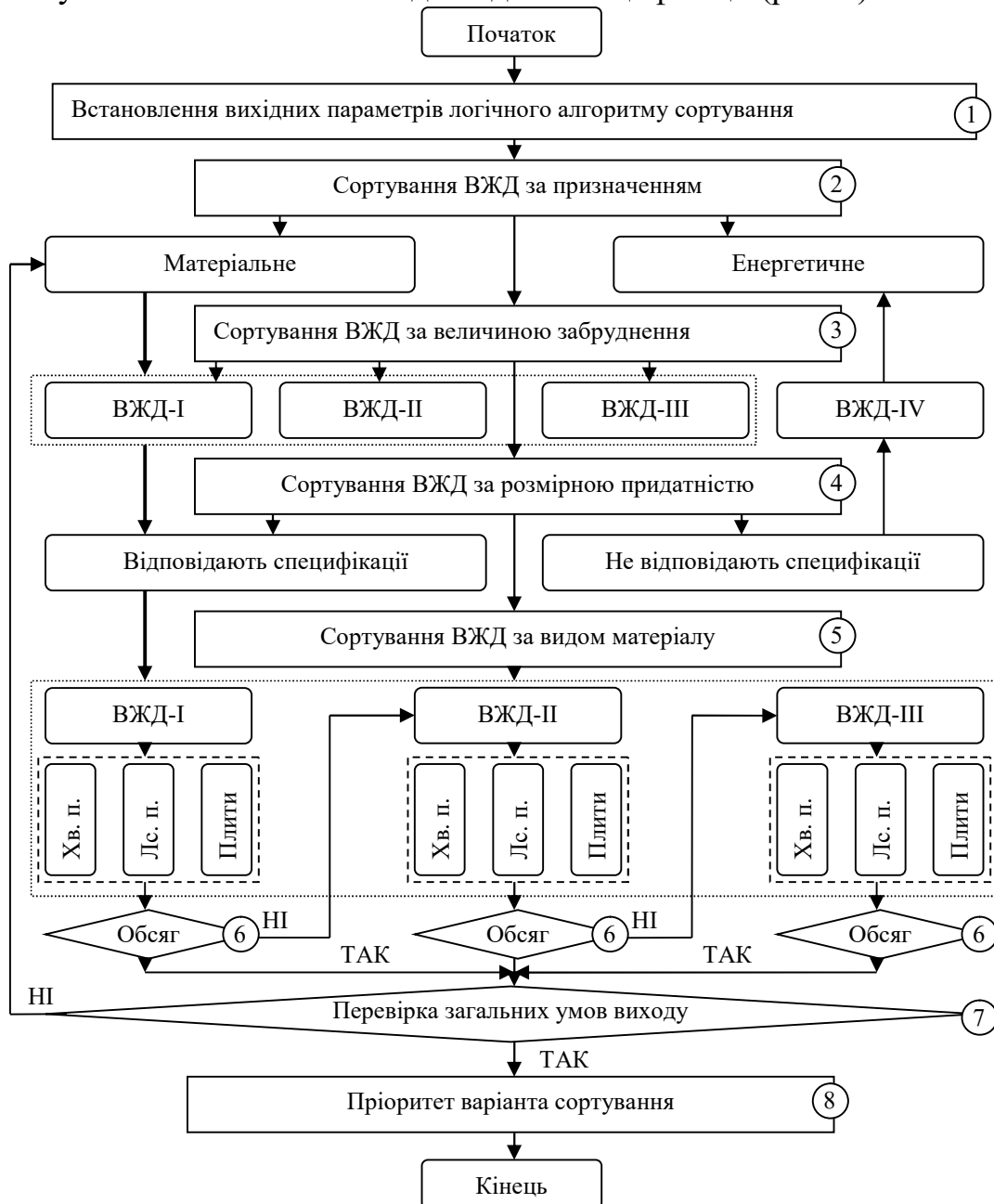


Рис. 2. Блок-схема логічного алгоритму (алгоритму моделювання) для визначення пріоритетного варіанту сортування ВЖД

Покрокова процедура логічного алгоритму для визначення пріоритетного варіанту сортування ВЖД:

Крок 1. Задаємо вихідні параметри логічного алгоритму сортування ВЖД, що забезпечать виконання специфікаційного завдання щодо обсягів розмірно-придатної ВЖД категорій за групами: I – хвойних порід; II – листяних порід; III – плитних матеріалів.

Крок 2. Сортиємо ВЖД за матеріальним та енергетичним призначенням.

Крок 3. Сортиємо ВЖД за величиною забруднення, тобто відповідно кваліфікаційних ознак – за категоріями ВЖД-I, ВЖД-II, ВЖД-III, ВЖД-IV. ВЖД-I – найчистіша ВЖД, ВЖД-IV – найбільш забруднена.

Крок 4. Сортиємо ВЖД за розмірною придатністю, тобто, знаючи специфікації майбутніх заготовок, відбираємо ВЖД більших розмірів.

Крок 5. Сортиємо ВЖД за матеріалом, тобто за породами хвойних та листяних порід. За потреби здійснюємо сортування за конкретними породами.

Крок 6. Аналізуємо обсяги відсортованої ВЖД за пріоритетністю починаючи від ВЖД-I до ВЖД-III, за всіма видами матеріалів. Аналізуємо обсяги відсортованої ВЖД за пріоритетністю кожної групи: I – хвойних порід; II – листяних порід; III – плитних матеріалів. Аналізуємо обсяги відсортованої ВЖД за пріоритетністю згідно з розмірами в специфікаціях майбутніх виробів.

Крок 7. Перевіряємо загальний обсяг виходу ВЖД. Аналізуємо можливі варіанти сортування та приймаємо рішення про оптимальний варіант.

Крок 8. Приймаємо рішення про пріоритет сортування за оптимальним варіантом в конкретний момент часу.

Середньозважені відсотки ВЖД при розрахунку обсягів ВЖД для матеріального використання, при сортуванні ВЖД за категоріями, при визначенні розмірно-придатної ВЖД при використанні її в масивному, цілісному, тобто неподрібненому вигляді подано на рис. 2. Як бачимо, 92 % матеріально придатної ВЖД надходить на сортування за категоріями, з цієї кількості для трьох перших категорій залишається 83 %. З кожної категорії маємо свої відсотки розмірно-придатної ВЖД: ВЖД-I становить 69 %, ВЖД-II – 66 %, а ВЖД-III – 50 %. У підсумку відсоток розмірно-придатної ВЖД становить 60 % від 83 % для матеріального використання, або 50 % від всієї ВЖД, що призначалась для сортування.

Особливості виготовлення розмірно-придатних заготовок для СП. Величезний асортимент ВЖД, який може потрапити на перероблення, потребує різнобічного аналізу, щоб стати вторинним деревинним ресурсом для потреб галузі. Надходження ВЖД на склади підприємств, де вже закладено витрати на збирання та транспортування, вимагає підвищення рівня її матеріального використання – максимального виготовлення розмірно-якісних заготовок із розмірно придатної ВЖД відповідно до специфікаційних замовлень. А на цей технологічний процес впливає багато чинників: властивості ВЖД: вологість, щільність, твердість, розбухання, величина поперечної анізотропії, міцність на сколювання вздовж волокон, міцність при статичному згині, коефіцієнти поперечної деформації, модуль пружності при статичному згині, модуль пружності при стиску, модуль зсуву, напруження; розмірно-якісна характеристика ВЖД: форма, довжина, товщина, ширина, площа, категорія, забрудненість, походження, вік, угруповання, різновидність; специфікація ЧЗ із ВЖД: довжина, товщина, ширина, вид перерізу, вид обробки.

Блок-схема евристичної моделі величини витрати ВЖД на виробництво чорнових заготовок заданої специфікації наведена на рис. 3.



Рис. 3. Блок-схема евристичної моделі величини витрати ВЖД на виробництво чорнових заготовок заданої специфікації

За результатами аналізу впливових чинників встановлено, що для визначення обсягу та підвищення точності визначення величини витрат заготовленої ВЖД у випилюванні заготовок доцільно поставити її у залежність від походження, величини забруднення та методу прогнозування об'ємного виходу розмірно-якісних заготовок за умови зміни їх специфікаційних розмірів. Адже при сортуванні визначальним є розмірна придатність ВЖД для майбутніх розмірно-якісних заготовок. Результати аналізу свідчать, властивості ВЖД навіть однакових порід, але різного походження відрізняються та можуть вимагати різних способів сортування, випилювання та очищення. У зв'язку з цим маємо також багато вхідних чинників: технологія сортування ВЖД: за категоріями, за породою, за матеріалом, за вологістю, за токсичністю, за походженням; технологія розкрою ВЖД: спосіб розкрою, метод відпилювання, схема розкрою, корисний вихід, специфікація відходів; технологія очищення ВЖД: вид очищення, спосіб очищення, метод очищення, схема очищення, якість очищення. Тип устаткування для сортування ВЖД: сортувальний пристрій, металошукач, вологомір, аналізатор токсичності, сканер; тип устаткування для очищення ВЖД: шліфувальний, фрезерний, щітковий, голкофрезерний верстати; тип устаткування для розкрою ВЖД: круглопилковий, багатопилковий, стрічкопилковий, форматно-розкрійний верстати, ручний електрифікований інструмент; рівень ПВП: кваліфікація персоналу, навички і стаж, відповідальність, досвід роботи.

Тому сьогодні актуальним завданням з матеріального перероблення ВЖД є визначення корисних виходів розмірно-придатної ВЖД та розроблення зручного програмного забезпечення для практичного користування в умовах виробництва з прогнозування об'ємного виходу заготовок заданої специфікації (габаритних розмірів, виду перерізу, кількості та якості), а також удосконалення розкрою ВЖД,

що має бути спрямоване на отримання максимально можливого корисного виходу запланованих специфікаційних заготовок.

Технологічні рішення з очищення ВЖД. Вироби з деревини для довготривалої експлуатації оброблялися органічними і неорганічними засобами захисту, облагороджувались лакофарбовими, паперовими або плівковими матеріалами. Ці засоби захисту, консерванти, завдяки структурі деревини і технологій облагородження, розташовуються на поверхні деревини або проникають безпосередньо в структуру деревини на долі міліметра її поверхні. Разом з видами домішок, перерахованих вище, часто відбувається вивітрювання деревини, яке відбувається через погодні умови навіть у захищеній деревині і, яке можна розрізнити за більшою крихкістю і за потемнінням поверхні деревини. У всіх цих описаних випадках, необхідно проводити поверхневе очищення від захисних покриттів або знімати певну кількість поверхневого шару дерев'яного матеріалу, щоб забезпечити можливість використання залишкової внутрішньої якісної частини ВЖД для матеріального виробництва. Механічне оброблення ВЖД фрезеруванням, струганням чи шліфуванням поверхні, виходячи з вище викладених міркувань, не завжди може бути виконане. Це також пов'язано з наявністю мінеральних домішок і металевих включень, з різними і неправильними формами, розмірами ВЖД.

Таким чином, вживана деревина, маючи широкий асортимент походження та різний ступінь забруднення, за матеріального використання потребує різного виду очищення: зовнішнього, поверхневого та внутрішнього. Щоб забезпечити якісно підготовлену ВЖД до технологічних процесів виготовлення продукції, потрібні технологічні і економічно обґрунтовані способи очищення ВЖД. Є два основні способи очищення забрудненої поверхні: сухий і вологий, і, в залежності від виду обробки, використовується той чи інший інструмент, компонент для безпосереднього очищення (табл. 2). Для суттєвого збільшення обсягу матеріальної придатної ВЖД, необхідно вирішити проблему поверхневого очищення і, в першу чергу, механізованим способом, зокрема, голкофрезерним інструментом.

Таблиця 2. Інструменти та компоненти для способів очищення ВЖД

Спосіб	ВЖД	Компоненти для очищення				
Сухий	Ручний	пилка	щітка	ніж	інструмент	
	Обладнанням	пісок	стиснуте повітря		гаряче повітря	
	Інструмент верстатів	фреза, абразив	голкофреза	ножовий вал	шипові ролики	барабан ротора
Вологий	Ручний	пилка	щітка	ніж	інструмент	
	Механічний	верстат	обладнання	пристрій	автоклав	басейн
	Хіміко-термічний	агент	темпе-ра	тиск	вакуум	час
	Гідротермічний	вода	темпе-ра	тиск	вакуум	час
	Паротермічний	пара	темпе-ра	тиск	вакуум	час

Актуальною особливістю голкофрезерного інструменту є його гнучка робоча поверхня, утворена безліччю робочих елементів – пружних кінцівок дротинки, що дозволяє використовувати дротовий інструмент для обробки заготовок з можливими відхиленнями від правильної геометричної форми. Ворсом голкофрези є сталевий пружинний дріт (60Г) діаметром 0,3 ... 0,9 мм.

З огляду на вищевказані переваги голкофрезерного інструменту, в процесі досліджень, визначено основні сфери застосування голкофрез у деревообробній

галузі, а саме очищення ВЖД від поверхневих забруднень: ефективно використання голкофрезерного інструменту для зняття лакофарбового матеріалу і матеріалу облицювання, включаючи ПВХ-плівки в процесі утилізації ВЖД – елементів старих меблевих, столярно-будівельних та інших виробів; заміна стругання чи фрезерування ВЖД голчастим інструментом з метою отримання підготовленої поверхні для подальшого матеріального використання; механічне оброблення модифікованих, особливо просочених деревинних матеріалів підвищеної твердості; отримання гребінчастої оброблюваної поверхні в процесі обробки еластичною голкофрезною масивною деревиною з явно вираженими ранньою і пізніми зонами.

Побудова технологічного процесу перероблення ВЖД на розмірно-придатні заготовки з розподілом обладнання в цеху. Основним устаткуванням проектного цеху з підготовки ВЖД є верстати прохідного типу для здійснення операцій поверхневого очищення: двобічний і чотирибічний голкофрезерні верстати. Розроблено типовий план цеху розміром 36×24 м, у якому передбачено сортування ВЖД за чотирма категоріями, за видом матеріалу – масив, плита; видаленням металевих включень та інших забруднень (рис. 4). Особливістю цеху є поділ його на чотири потоки. У першому та другому обробляється масивна ВЖД – відповідно категорій: чиста ВЖД-I та забруднена ВЖД-IV.

В іншій половині цеху проводять оброблення плитних матеріалів: в третьому потоці – ВЖД-II, яка забруднена лакофарбовими матеріалами без речовин захисту деревини та без галогеноорганічних зв'язків у покриттях; в четвертому потоці – ВЖД-III, яка забруднена лакофарбовими матеріалами без речовин захисту деревини, але з галогеноорганічними зв'язками у покриттях.

речовин захисту деревини, але з галогеноорганічними зв'язкам

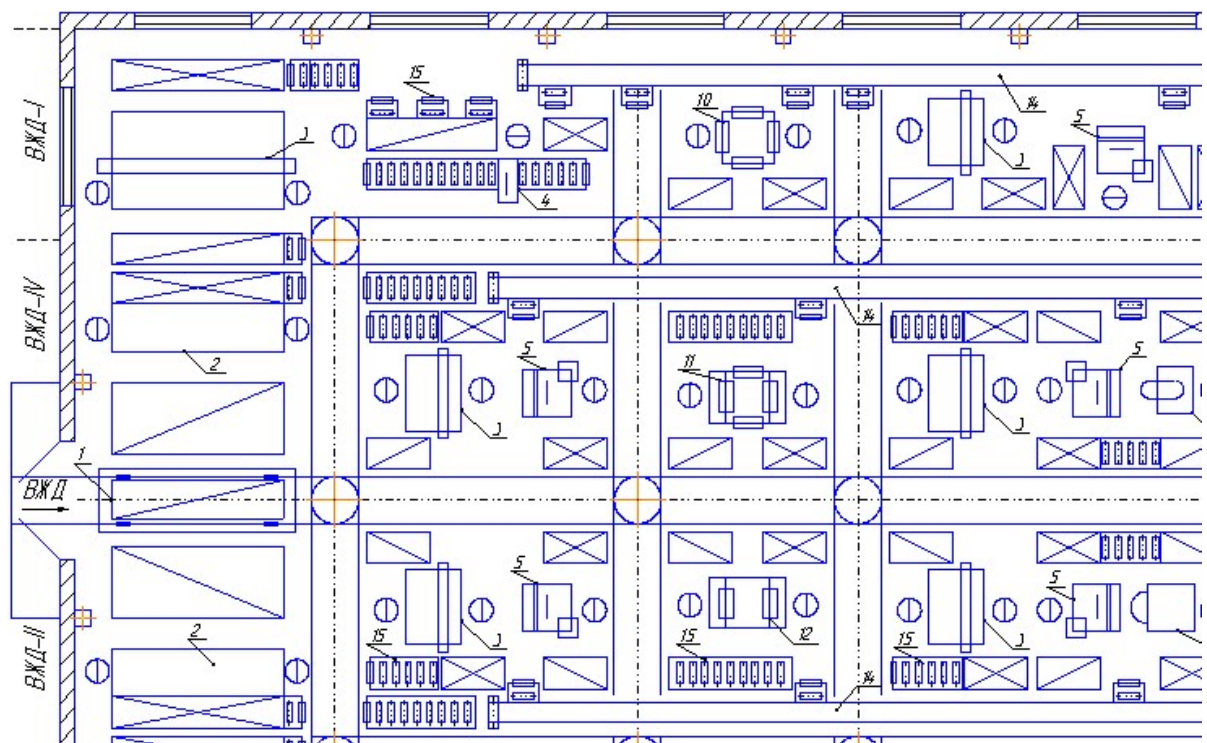


Рис. 4. – Типовий план цеху з очищення ВЖД: 1 – траверсів візок, 2 – робочий стіл, 3 – металодетектор, 4 – торцювальний в-т, 5 – круглопилковий в-т, 6 – стрікопильний в-т, 7 – фрезерний в-т, 8 – крайкошліфовальний в-т, 9 – форматно-розкрійний в-т, 10 – чотирибічний шліфувальний в-т, 11 – чотирибічний голкофрезерний в-т, 12 – двобічний голкофрезерний в-т, 13 – двобічний шліфувальний в-т, 14 – конвеєр, 15 – секції рольганга

Після поділу за видом матеріалу та ідентифікації за якістю проводять операцію зовнішнього очищення від металевих та інших видимих включень. Виявлення металевих елементів здійснюють за допомогою металодетекторів, які встановлені для кожного виду матеріалу з двох боків від центрального заїзду в цех. Після здійснення відповідних міток, проводиться випилювання дефектних місць та ВЖД з металевими включеннями, які видаляються з цеху боковими стрічковими конвеєрами і транспортується траверсними візками до іншого цеху – подрібнення та очищення. Далі на розкрійних верстатах відтинають дефектні місця та розкроюють на кратні заготовки, які надходять на операції поверхневого очищення голкофрезерними та шліфувальними верстатами. Після поверхневого очищення, за потреби, проводиться повторне виявлення металевих включень за допомогою металодетекторів, які є у кожному з чотирьох потоків. Бездефектна ВЖД стає придатною для одержання заготовок на верстатах вторинного машинного оброблення. Основою цеху є верстати прохідного типу для здійснення операцій поверхневого поздовжнього очищення. Зокрема, для ВЖД-I використовується чотирибічний шліфувальний, для ВЖД-II – двобічношліфувальний, для ВЖД-III – двобічногголкофрезерний, для ВЖД-IV – чотирибічний голкофрезерний.

Таким чином, підготовлена ВЖД за такими стадіями та рекомендаціями (табл. 3) є додатковою сировиною для виготовлення столярної плити, меблевого щита та інших виробів з деревини.

Таблиця 3. Рекомендації до технологічного процесу підготовки ВЖД

№	Стадії та операції	Устаткування
1	Збирання, накопичування за типом	Місця утворення, господарства
2	Привезення до місць перероблення	Транспортні засоби
3	Ідентифікація ВЖД за категоріями	Візуально, приладами
4	Сортування за матеріалом, породою	Вручну, автоматично
5	Сегрегація за вологістю, забрудненням	Візуально, приладами
6	Індикація на недопустимі хімікалії	Індикатор, дослідження
7	Очищення від зовнішніх включень	Інструмент, фізично
8	Видалення видимого металу	Метало-детектор, фізично
9	Очищення від покриттів (плівок)	Верстати для очищення
10	Розподіл за технологіями	Процеси перероблення

Висновки:

1. У результаті дослідження розроблено алгоритм формування етапів технологічного процесу виготовлення СП із ВЖД, який ґрунтується на поетапному аналізі та моделюванні технологічних операцій. Запропонована загальна структурна схема перероблення ВЖД охоплює всі основні технологічні ланки — від збирання матеріалу до формування готових плит, що дозволяє раціоналізувати виробничий процес і зменшити втрати матеріалу. Моделювання технологічних рішень довело ефективність поетапного підходу до перероблення ВЖД, особливо з урахуванням її різномірності, забруднення та пошкоджень.

2. Обґрунтовано, що найбільш реальним і практично застосовним підходом до вирішення задачі сортування є аналіз (обсягів накопичення ВЖД для матеріального чи енергетичного використання, обсягів ВЖД за величиною забруднення (сортування за категоріями), обсягів ВЖД за розмірною придатністю (для одержання специфікаційних заготовок) та опис самої процедури прийняття поточних рішень про достатні обсяги ВЖД.

3. Запропоновано способи поверхневого очищення ВЖД, зокрема, механізований спосіб за допомогою голкофрезерного інструменту. Розроблено принципову схему моделювання процесу поверхневого очищення голкофрезами. Створення розмірно-придатних заготовок із ВЖД є

ключовим етапом, що забезпечує стабільну якість готової столярної продукції та підвищує ефективність використання вторинної сировини.

4. Розроблено типовий план цеху, у якому передбачено сортування ВЖД за чотирма категоріями, за видом матеріалу – масив, плита; видаленням металевих включень та інших забруднень. Основою цеху є верстати прохідного типу для здійснення операцій поверхневого позовжнього очищення. Зокрема, для ВЖД-I використовується чотирибічний шліфувальний, для ВЖД-II – двобічношліфувальний, для ВЖД-III – двобічний голкофрезерний, для ВЖД-IV – чотирибічний голкофрезерний. Таким чином, очищена за такими стадіями та рекомендаціями ВЖД є додатковою сировиною для виготовлення столярної плити та інших конструкційних матеріалів.

References

1. **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.
2. **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.
3. **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.
4. **Ferents O.B.** (2006). *Rozrobyty naukovo obgruntovani normatyvy vytrat derevyiny u vyrobnytstvi stolyarno-budivelnykh vyrobiv* / [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).
5. **Ferents O.B., Maksymiv V.M.** (2011). *Tekhnolohiya stolyarnykh vyrobiv* [Technology of joiner's products]. – Lviv: UNFU, 2011. – 400 p. (in Ukrainian).
6. **Gayda S.V.** (2007). Research of concentration of operations is in modern furniture Productions. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 33:73-79 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/42073314>
7. **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 June 23-26. 2013). TU Zvolen, 119-130.
8. **Gayda S.V.** (2013). Розроблення технології виробництва паливних гранул на основі енергетичного потенціалу ВЖД [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).
9. **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.
10. **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>
11. **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>
12. **Gayda S.V.** (2014). *Teoreticheskoye obosnovaniye podkhoda po prognozirovaniyu prochnosti drevestruzhechnykh 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.
13. **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.
14. **Gayda S.V.** (2016). Технологічні підходи до поверхневого очищення ВЖД голкофрезерним інструментом [Technological approaches to cleaning of surface of post-consumer wood of needle-milling tools]. *Bulletin of KhNTUA* 178:3-11(in Ukrainian).
15. **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.
16. **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>
17. **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.
18. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). *Bulletin of KhNTUA* 197:3-9, (in Ukrainian).

19. **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>
20. **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>.
21. **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).
22. **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>
23. **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>
24. **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>
25. **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>.
26. **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>.
27. **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>
28. **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>.
29. **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>
30. **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>
31. **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>
32. **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>
33. **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.
34. **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>
35. **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>
36. **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>
37. **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>
38. **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>
39. **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>

40. **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>
41. **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>
42. **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>
43. **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>
44. **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>.
45. **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).
46. **Project «CircHive – Developing & piloting biodiversity footprinting & natural capital accounting via a 'beehive' of sectoral hubs, for sustainable transition to a circular EU bioeconomy».** Project Schedule: Start Date 01.12.2022 End Date 30.11.2027.
47. **Ratajczak, E.** (2003). *Zasoby odpadów drzewnych w Polsce / E. Ratajczak, A Szostak. Poznan: Czysa Energia, – Vol. 6. – P. 122-125.*
48. **Reike, D., & Vermeulen Walter, J.V.** (2018). The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? // *Resources, Conservation and Recycling*. P. 246-264.
49. **Shevchenko T. I., Shuptar-Porivayeva N. Y., Gubanova O. R. and others.** (2022). *Циркулярна економіка [Circular economy]*. Sumy: University book. – 220 p. (in Ukrainian).
50. **State Statistics Service of Ukraine.** <https://www.ukrstat.gov.ua>
51. **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*,
52. **Titus, B.D., Brown, K., & Helmisaari, HS. et al.** (2021). Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines. *Energ Sustain Soc* 11, 10. <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00281-w>.
53. **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>.
54. **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>.
55. **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>.
56. **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>
57. **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>
58. **Гайда С.В.** Визначення характеристик СП із ВЖД: матеріали тез доповідей міжнародної НПК (05-06.06.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 118-120. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17079555>
59. **Гайда С.В.** Встановлення показника циркулярності в лісовому секторі: матеріали тез доповідей XIV МНПК (м. Чернігів, 23–24 травня 2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.2. – С. 192-194.
60. **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>
61. **Гайда С.В.** Основи створення гнучких виробничих систем. Гнучкі автоматизовані виробництва та робототехніка в деревообробці: Ч.1. – Львів: ЦНТЕІ, 1998. – 149 с.
62. **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>
63. **Гайда С.В.** Технології ВЖД як дієві механізми для реалізації принципів циркулярної економіки: матеріали тез доповідей НПК (05-06.06.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 137-139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17079555>

64. Гайда С.В., Гузь М.М., Никитюк Л.О. Корневая древесина-источник дополнительного сырья для плитного производства. Матеріали НТК. Архангельск, (21-25.09.1992). ЦНИИМОД. – С. 88-89.
65. Гайда С.В., Кшивецький Б.Я. Оперативно-виробниче планування гнучких виробничих систем // Метод. вказівки. – Львів : ЦНТЕІ, 2000. – 29 с.
66. Гайда С.В., Кшивецький Б.Я. Проектування гнучких виробничих систем: Метод. вказівки. – Львів : ЦНТЕІ, 1998. – 34 с.
67. Гайда С.В., Лесів Л.Е. Міцність комбінованих СП із ВЖД ялиці: матеріали тез Н-ПК (24-25.05.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 128-130. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
68. Гайда С.В., Лесів Л.Е. Побудова моделі міцності зрощених заготовок із ВЖД 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>
69. Гайда С.В., Лесів Л.Е. Порівняльний аналіз комбінованих СП із ВЖД: матеріали тез доповідей XIV МНПК (м. Чернігів, 23–24 травня 2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 215-217.
70. 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>
71. Гайда С.В., Медвідь Л.В. Дослідження міцності при статичному згині СП із ВЖД: матеріали тез Н-ПК (7-8.10.2024 р.). – Харків : ДБТУ, 2024. – С. 193-195. <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/conf-07-08-10-24-mater.pdf>
72. Гайда С.В., Медвідь Л.В. Міцність звичайних СП із ВЖД: матеріали тез XIV МН-ПК (23–24.05.2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 213-214.
73. Гайда С.В., Медвідь Л.В. Побудова математичної моделі міцності СП різних конструкцій із ВЖД. Наук. праці ЛАН України : зб. наук. праць. – 2024, вип. 27. – С. 180-189. <https://doi.org/10.15421/412426>
74. Гайда С.В., Медвідь Л.В. Технологія поверхневого очищення ВЖД голкофрезерним інструментом: матеріали тез доповідей НПК (м. Харків, 24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 134-136. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
75. Гайда С.В., Подібка Т.І. Вплив товщини рейок на формостійкість меблевих щитів: Матеріали тез доповідей XV МНПК (м. Чернігів, 22-23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.1. – С. 184-186. <https://conference-chnihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
76. Гайда С.В., Подібка Т.І. Забезпечення площинності меблевих щитів із бука європейського: матеріали тез доповідей НПК (м. Харків, 24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 137-139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
77. Гайда С.В., Подібка Т.І. Формостійкість меблевих щитів із сосни звичайної: матеріали тез доповідей XIV МНПК (м. Чернігів, 23–24 травня 2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 211-212.
78. 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-chnihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
79. Гайда, С.В. Перспективи роботизації меблевої промисловості України. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2003. – Вип. 11 – С. 36-37.
80. Гайда, С.В. Прогресивні плитні матеріали MDF та OSB. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 1 – С. 30-32.
81. Гайда, С.В. Що нам важко стілець зробити? Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 3 – С. 44-52.
82. Грицак С.С., Грицак С.А., Гайда С.В. Встановлення залежності довжини бездефектної дуги деревини ясеня 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-chnihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
83. 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>
84. 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-chnihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
85. Лесів Л.Е., Гайда С.В., Салапак Л.В. Розроблення математичної моделі міцності зрощених заготовок із ВЖД ялиці. Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть. – 2024, вип. 50. – С. 16-28. doi: <https://doi.org/10.36930/42245002>
86. 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-chnihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>

- 87.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>
- 88.Медвідь Л.В., Гайда С.В. Математична модель формостійкості звичайних СП із ВЖД: Матеріали тез доповідей XV МНПК (м. Чернігів, 22-23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.1. – С. 188-190. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
- 89.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>
- 90.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>
- 91.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>
- 92.Удовичий О.М., Гайда С.В. Салабай Р.Г. Некондиційна деревина у бетонних виробках: Матеріали тез XV МН-ПК (22-23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.2. – С. 141-142. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
- 93.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/10.36930/42255104>
- 94.Гайда С.В. Матеріали для виготовлення виробів з деревини: Навч. пос. – Л.: ВМС, 2000. - 160 с.

UDC 674-419.33:674.8

Post-graduate student L.V. Medvid – UNFU

Creation of an algorithm for forming the stages of the technological process for manufacturing blanks for blockboards from post-consumer wood

The problem of rational use of post-consumer wood (PCW) is considered by creating an algorithm for forming the stages of the technological process for manufacturing blockboard of various designs, which is based on a phased analysis and modeling of technological operations. A general structural scheme for processing used wood is proposed, covering all the main technological links - from material collection to the formation of finished boards, which allows rationalizing the production process and reducing material losses. Modeling of technological solutions has proven the effectiveness of a phased approach to processing used wood, especially taking into account its heterogeneity, pollution and damage. It is substantiated that the most realistic and practically applicable approach to solving the sorting problem is the analysis (of the volumes of accumulation of waste wood for material or energy use), the volumes of waste wood by the amount of contamination (sorting by categories), the volumes of waste wood by dimensional suitability (to obtain specification blanks) and the description of the procedure for making current decisions about sufficient volumes of waste wood. Methods of surface cleaning of waste wood are proposed, in particular. a mechanized method using a needle milling tool. The production of dimensionally suitable blanks from used wood is a key stage that ensures stable quality of finished joinery products and increases the efficiency of using secondary raw materials. A typical workshop plan has been developed, which provides for sorting of waste wood by four categories, by type of material - solid wood, board; by removing metal inclusions and other contaminants. The basis of the workshop are through-type machines for performing surface longitudinal cleaning operations. In particular, for PCW-I, a four-sided grinding machine is used, for PCW-II – a two-sided grinding machine, for PCW-III – a two-sided needle milling machine, for PCW-IV – a four-sided needle milling machine. This approach helps to optimize production processes, increase the efficiency of material processing and reduce wood waste. PCW prepared according to such stages and recommendations is an additional raw material for the production of blockboard and other structural materials.

Keywords: post-consumer wood, blockboard, technological process, algorithm, wood processing, modeling, blanks, sorting, cutting, secondary raw materials.



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

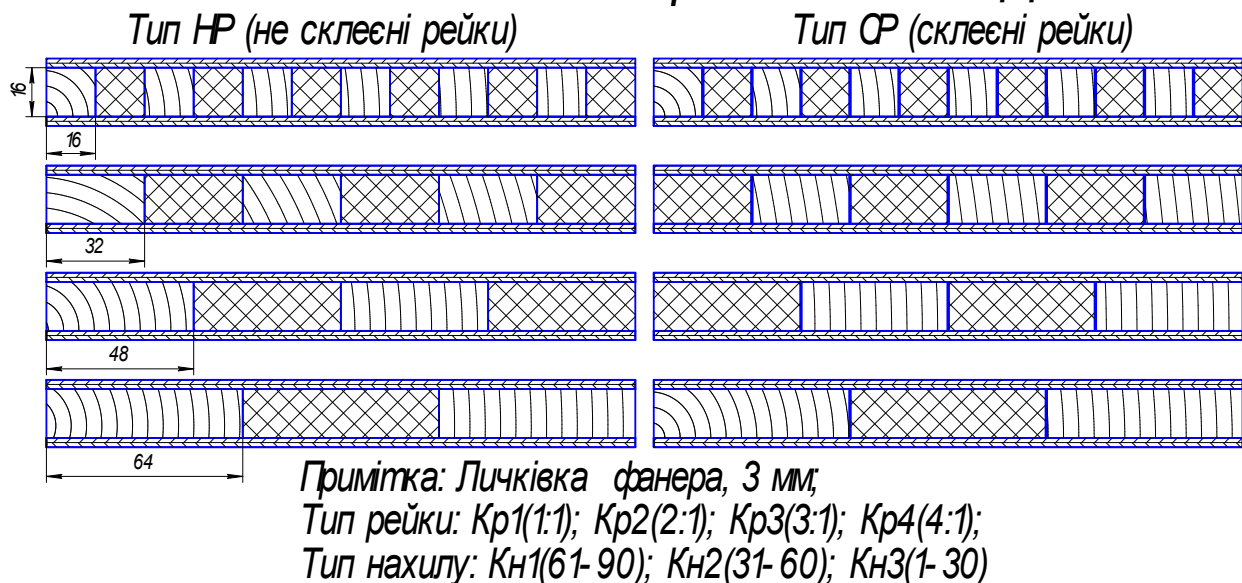


Рис. 2. Конструкції комбінованих столярних плит із ВЖД

Методика моделювання. Методика прогнозування властивостей СП, яка складається з клеєних 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 площинах. 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 stolyarnikh 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.



Аспірант Ю.О. Козак¹ – НЛТУ України

ПОБУДОВА РЕГРЕСІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ ВПЛИВУ ЩІЛЬНОСТІ, ВО- ЛОГОСТІ ТА МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ

Досліджено та визначено закономірності впливу фізико-механічних властивостей основних конструкційних деревинних матеріалів на міцнісні характеристики дерев'яних конструкцій. Встановлено, що щільність ($r=0,82$) та модуль пружності ($r=0,88$) мають найвищу кореляцію з міцністю при стиску та статичному згині, тоді як вологість чинить сильний негативний вплив ($r=-0,76$). Підвищення вологості з 10% до 20% знижує міцність при стиску вздовж волокон на 18-25%, причому найбільш чутливими виявилися CLT та масивна сосна, а найстійкішим – LVL. Розроблена багатофакторна регресійна модель для прогнозування міцності при статичному згині на основі щільності, модуля пружності та вологості ($R^2=0,91$) демонструє високу точність та придатна для практичного застосування у проектуванні дерев'яних конструкцій. Визначено, що сучасні конструкційні матеріали (LVL, GLT) мають стабільніші міцнісні показники та меншу варіативність властивостей порівняно з суцільною деревиною, що робить їх ефективними для експлуатації у змінних кліматичних умовах. Надані рекомендації з вибору матеріалів сприятимуть підвищенню надійності та довговічності конструкцій. Обґрунтовано необхідність подальших досліджень з випробуванням повномасштабних елементів у реальних умовах і вивченням впливу комбінованих навантажень за змінної вологості та температури.

Ключові слова: деревина, міцність, вологість, щільність, модуль пружності, LVL, GLT, CLT, конструкційні матеріали, дерев'яні конструкції.

Вступ. Актуальність. Деревина та матеріали на її основі залишаються одним із ключових конструкційних матеріалів у будівництві завдяки поєднанню високих питомих міцнісних характеристик, екологічності та принципів циркулярної економіки [23, 54, 59, 62], відновлюваності та естетичної привабливості [2, 3, 22, 36, 56, 57, 63, 64, 65, 77, 78, 82]. У сучасних умовах зростає попит на енергоефективні, легкі та довговічні конструкції, що зумовлює активне використання як традиційної суцільної деревини, так і клеєних деревинних матеріалів (клеєна деревина, LVL, CLT, OSB тощо). Проте міцнісні характеристики дерев'яних конструкцій залежать від комплексу фізико-механічних властивостей матеріалу, які формуються під впливом породи деревини, умов її обробки, вологості, щільності та структури волокон [6, 7, 13, 16, 17, 22, 25, 27, 38, 40, 43, 47, 58, 60, 61, 66, 69, 73, 75], а також від термінів експлуатації виробів – вживаної деревини [6, 8, 10, 13, 22, 29, 34, 46]. Незважаючи на наявність нормативних документів (ДСТУ, EN, ISO, Eurocode 5), у проектній практиці досі спостерігається невідповідність між розрахунковими та реальними міцнісними показниками конструкцій, що часто пов'язано з недостатнім врахуванням впливу фізико-механічних властивостей деревини. Це особливо актуально для умов експлуатації [1, 22, 65] зі змінною вологістю, температурою та навантаженнями, де поведінка деревини відрізняється від ідеалізованих моделей.

¹ Козак Юрій Орестович – 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, +38-067-680-44-57. E-mail: kozak.iurii@ntu.lviv.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4700-6989>

Аналіз сучасних досліджень. Дослідження взаємозв'язку між фізико-механічними властивостями деревини та міцністю конструкцій розглядалися у працях різних науковців [3, 4, 5, 7, 22, 41, 47, 52, 53, 68, 70, 74, 87, 88]. Відомо, що щільність деревини має сильну кореляцію з її міцністю при стиску та статичному згині, а вологість суттєво знижує ці показники. Модулі пружності (E та G) визначають жорсткість елементів і впливають на розрахунки деформацій. Проте більшість робіт або присвячені окремим породам, або зосереджені на лабораторних випробуваннях без інтеграції результатів у комплексну аналітичну модель для прогнозування міцності конструкцій. Сучасні дослідження вказують на необхідність розробки методів, що поєднують експериментальні дані з розрахунковими моделями, враховуючи комплекс фізико-механічних характеристик [31, 67, 71, 91, 93]. Це дозволить підвищити точність розрахунків та забезпечити оптимальний вибір матеріалів [21, 30, 32, 39, 45, 49, 50, 51, 55, 89, 92] на етапі проєктування.

Проблематика. Попри накопичений обсяг досліджень, залишаються невирішеними такі питання: відсутність узагальнених кількісних залежностей між комплексом фізико-механічних характеристик та міцнісними показниками отриманих матеріалів: ДСП [11, 12, 33, 37], столярна плита [14, 17, 21, 22, 27, 42, 44], меблевий щит [18, 20, 35, 48, 58, 65, 72, 73, 80, 81, 83, 84, 90]; обмежене врахування впливу вологості та її змін у процесі перероблення, зокрема вживаної деревини [15, 22, 28, 41] та експлуатації готових виробів; недостатня адаптація експериментальних даних до умов реального використання; потреба в рекомендаціях для вибору оптимальних матеріалів залежно від призначення конструкцій [9, 18, 19, 26, 28, 42, 62, 76, 79, 85, 86] у готовому виробі.

Об'єкт дослідження – дерев'яні конструкції, що виготовлені з основних конструкційних деревинних матеріалів. **Предмет дослідження** – закономірності впливу фізико-механічних властивостей конструкційних деревинних матеріалів на міцнісні характеристики дерев'яних конструкцій.

Мета дослідження – встановити та обґрунтувати закономірності впливу фізико-механічних властивостей основних конструкційних деревинних матеріалів на міцнісні характеристики дерев'яних конструкцій з метою підвищення їх надійності, довговічності та ефективності проєктування. **Гіпотеза дослідження** – передбачається, що фізико-механічні властивості деревинних матеріалів (щільність, вологість, модулі пружності, міцність при стиску та статичному згині) мають визначальний вплив на несучу здатність та деформаційні характеристики дерев'яних конструкцій, і що встановлення кількісних залежностей між цими параметрами дозволить оптимізувати вибір матеріалів і технологій виготовлення конструкцій.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасні види конструкційних деревинних матеріалів та їх фізико-механічні характеристики.
2. Визначити основні міцнісні показники дерев'яних конструкцій та їх залежність від властивостей матеріалів.
3. Розробити методику оцінки впливу фізико-механічних параметрів деревини на несучу здатність конструкцій.
4. Провести дослідження зразків деревини різних порід та видів матеріалів.
5. Встановити кількісні та якісні закономірності впливу фізико-механічних властивостей на міцність конструкцій.
6. Сформулювати рекомендації для вибору матеріалів та проєктування дерев'яних конструкцій з оптимальними міцнісними характеристиками.

Наукова новизна. Уперше встановлено комплексні кількісні та якісні залежності між фізико-механічними властивостями основних конструкційних деревинних матеріалів і міцнісними показниками дерев'яних конструкцій. Розроблено удосконалену методику прогнозування міцності конструкцій на основі інтегральних параметрів матеріалу, що дозволяє враховувати вплив породи деревини, вологості, щільності та модулів пружності в єдиній аналітичній моделі.

Практичне значення. Отримані результати дають змогу оптимізувати процес вибору конструкційних деревинних матеріалів на етапі проектування, підвищити надійність та довговічність дерев'яних конструкцій, а також зменшити матеріаломісткість за рахунок точнішого прогнозування їх несучої здатності. Рекомендації можуть бути використані у проектних організаціях, будівельних компаніях та при розробці нормативних документів щодо дерев'яних конструкцій.

Методика дослідження. Методика розроблена з метою визначення закономірностей впливу фізико-механічних властивостей конструкційних деревинних матеріалів на міцнісні характеристики дерев'яних конструкцій. Дослідження передбачає комплекс лабораторних випробувань зразків деревини та матеріалів на її основі, обробку експериментальних результатів статистичними методами та моделювання поведінки конструкцій у реальних умовах експлуатації.

Вибір матеріалів та підготовка зразків. До дослідження були залучені основні типи конструкційних деревинних матеріалів: суцільна деревина (сосна, дуб); клеєна ламінована деревина (GLT); шпонована конструкційна деревина (LVL); перехресно-клеєні панелі (CLT). Зразки готували згідно з вимогами ДСТУ EN 408 та ДСТУ ISO 13061. Розміри та форма зразків відповідали стандартам для випробувань на стиск, розтяг, вигин та визначення модулів пружності.

Визначення фізико-механічних властивостей.

Щільність. Визначення щільності проводилося методом зважування зразків та вимірювання їхніх геометричних розмірів у сухому стані (вологість до 12%).

$$\rho = m/V,$$

де: ρ – щільність, кг/м^3 ; m – маса зразка, кг ; V – об'єм зразка, м^3 .

Вологість. Вологість визначали сушильним методом згідно з ДСТУ ISO 13061-1: $W = (m_v - m_c) / m_c \cdot 100\%$,

де m_v – маса зразка у вологому стані; m_c – маса зразка після висушування.

Модулі пружності. Модуль пружності при статичному згині (E) визначали методом триточкового згину за формулою: $E = l^3 \cdot F / (4 \cdot w \cdot h^3 \cdot f)$,

де: l – проліт між опорами; F – навантаження; w , h – ширина та висота зразка; f – прогин у центрі.

Модуль зсуву (G) визначали методом випробування зразків на зсув згідно з ДСТУ EN 408. **Міцність при стиску вздовж волокон та міцність при статичному згині.** Випробування на міцність виконували на універсальній випробувальній машині IP-05 із реєстрацією навантаження та деформацій. Визначали:

- межу міцності при стиску вздовж волокон;
- межу міцності при статичному згині.

Методична сітка експерименту (табл. 1) відображає діапазони змінних факторів, що використовувалися під час планування експериментів: вологість деревини (W), густина (ρ) та модуль пружності (E) та діапазони досліджень вихідних величин: міцність при стиску вздовж волокон ($\sigma_{\text{стиск}}$) та міцність при статичному

згині ($\sigma_{\text{згин}}$). Для визначення вихідних параметрів було створено експериментальну матрицю планування за змінними факторами для дослідження, де кожна точка на смузі діапазону відповідала конкретному досліді. Такий підхід дозволяє наочно представити зони відбору значень факторів та розташування дослідних комбінацій у межах робочого діапазону досліджень вихідних величин.

Таблиця 1. Діапазони змінних факторів для дослідження впливу на міцність деревинних матеріалів у межах робочого діапазону досліджень вихідних величин

№	Змінні фактори	Позначення	Одиниці виміру	Нижнє значення	Середнє значення	Верхнє значення
1	Вологість деревини	W	%	8	14	20
2	Густина	ρ	кг/м ³	450	575	700
3	Модуль пружності	E	МПа	10500	11750	13000
	Вихідні величини					
1	Міцність при стиску вздовж волокон	$\sigma_{\text{стиск}}$	МПа	45	55	65
2	Міцність при статичному згині	$\sigma_{\text{згин}}$	МПа	80	90	100

Статистична обробка результатів. Для обробки експериментальних даних застосовували: визначення середніх значень та стандартних відхилень; коефіцієнти варіації; кореляційний аналіз для виявлення зв'язків між фізико-механічними параметрами та міцнісними характеристиками; багатофакторний регресійний аналіз для побудови рівнянь прогнозування. Обробку виконували в Microsoft Excel.

Перевірка адекватності моделей. Адекватність побудованих моделей перевіряли шляхом порівняння розрахункових і експериментальних результатів за критерієм Фішера та критерієм Стюдента.

Результати. Фізико-механічні характеристики досліджених матеріалів. Експериментальні випробування охопили п'ять груп конструкційних деревинних матеріалів: масив сосни, масив дуба, клеєна ламінована деревина (GLT), шпонована конструкційна деревина (LVL) та перехресно-клеєні панелі (CLT). Середні значення основних фізико-механічних показників наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Фізико-механічні властивості досліджених матеріалів

Матеріал	Щільність, кг/м ³	Вологість, %	Модуль пружності E, МПа	Модуль зсуву G, МПа	Міцність при стиску вздовж волокон, МПа	Міцність при статичному згині, МПа
Сосна	520	11,5	10500	680	47,2	83,4
Дуб	690	10,8	12900	880	61,3	98,6
GLT	490	11,2	11600	750	49,5	86,1
LVL	540	10,9	12500	810	54,8	92,7
CLT	470	11,4	11200	720	46,0	84,2

Вплив вологості на міцнісні показники. Встановлено, що підвищення вологості з 10% до 20% призводить до зниження міцності при стиску вздовж волокон у середньому на 18-25% залежно від матеріалу (рис. 1). Найчутливішими до змін вологості виявилися зразки CLT та суцільної сосни, найменш – LVL.

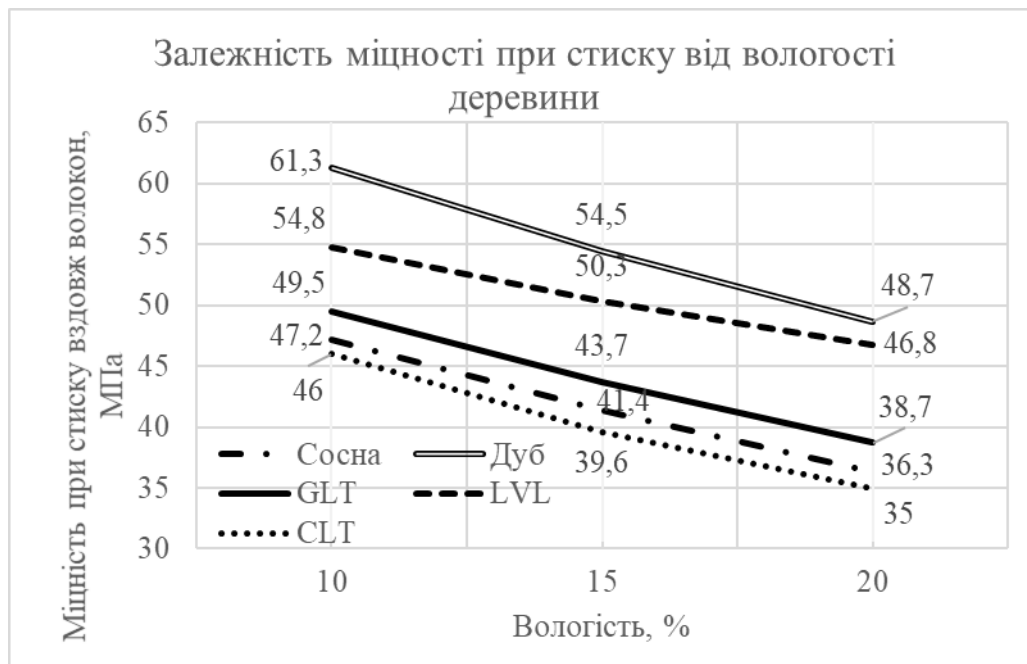


Рис. 1. Залежність міцності при стиску від вологості деревини

Графік демонструє стабільне зниження міцності при стиску вздовж волокон із підвищенням вологості на 5% та на 10% для всіх досліджених матеріалів відповідно, зокрема: для сосни на 12, 29 МПа та 23,09 МПа; для дуба на 11,09 МПа та 20,55 МПа; для GLT на 11,72 МПа та 21,82 МПа; для LVL на 8,21 МПа та 14,60 МПа; для CLT на 13,91 МПа та 23,91 МПа. Таким чином, найбільше падіння спостерігається у CLT та сосни (понад 23%), найменше – у LVL (близько 15%), що свідчить про вищу вологостійкість матеріалів. Залежність щодо міцності при статичному згині має аналогічний характер до стиску: зі збільшенням вологості міцність при статичному згині також зменшується (рис. 2). Найбільш стійким до впливу вологи (при зміні від 10 до 20%) залишається LVL (13,59%), тоді як CLT (18,29%) та сосна (19,06 %) демонструють найшвидше зниження. У середньому падіння становить 13-19% при зволоженні до 20%.

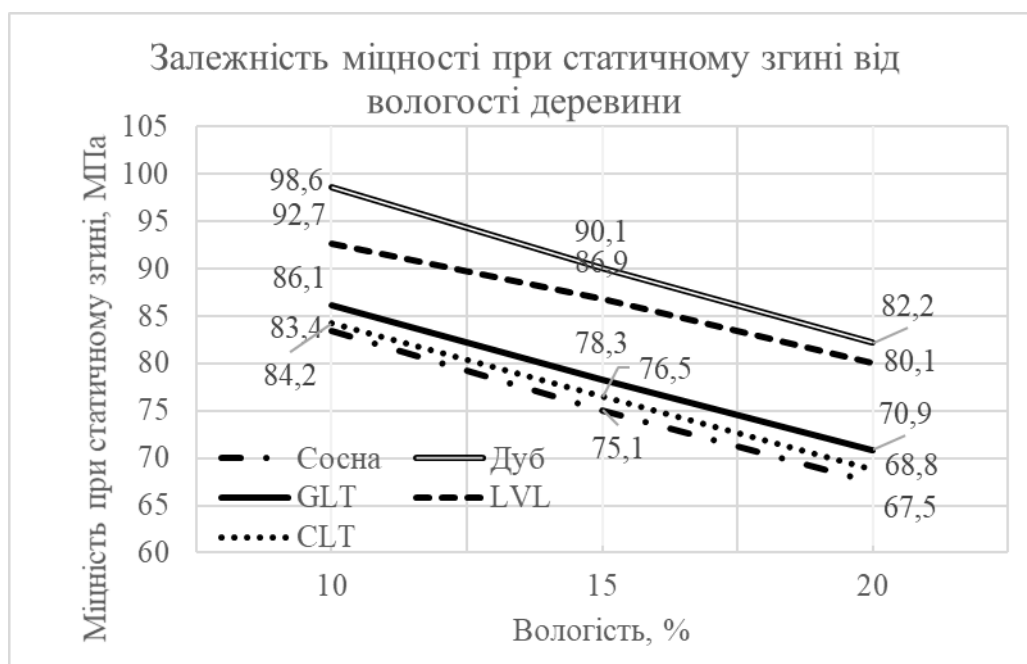


Рис. 2. Залежність міцності при статичному згині від вологості деревини

Встановлено чіткий прямий зв'язок між щільністю матеріалу та його міцністю при стиску (рис. 3). Дуб, що має найбільшу щільність (690 кг/м^3), демонструє і найвищу міцність ($61,3 \text{ МПа}$). У матеріалів з меншою щільністю (CLT, GLT) значення міцності при стиску нижчі, що узгоджується з теоретичними уявленнями про вплив щільності на механічні властивості.

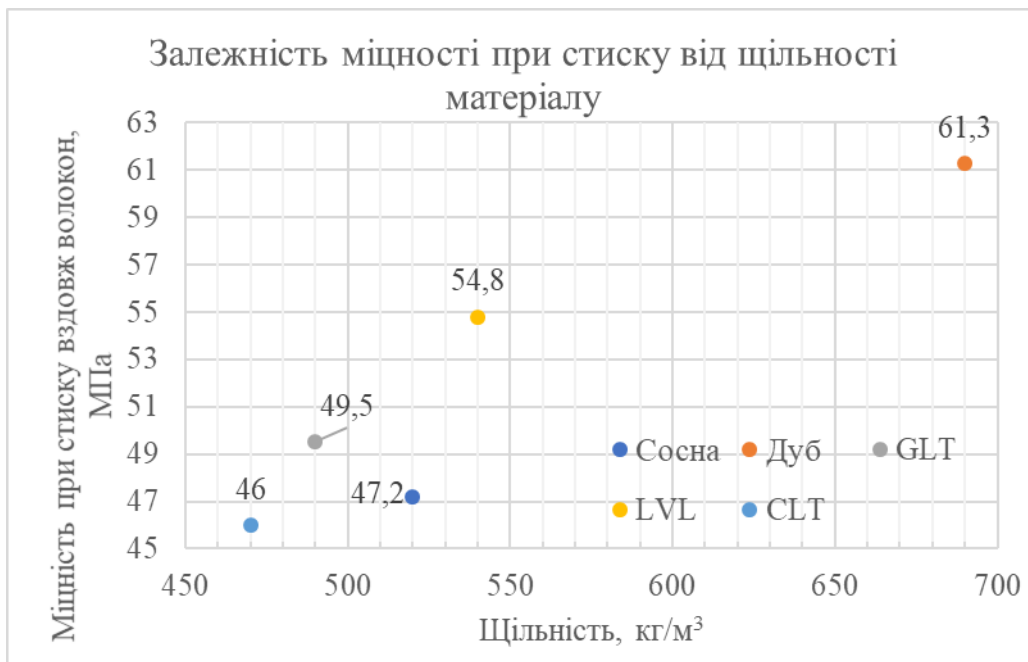


Рис. 3. Залежність міцності при стиску від щільності деревини

Подібно до стиску, міцність при статичному згині прямо пропорційна щільності (рис. 4). Найвищі показники знову продемонстрував дуб ($98,6 \text{ МПа}$), а найнижчі – CLT ($84,2 \text{ МПа}$). Проте LVL, маючи щільність середнього рівня (540 кг/м^3), демонструє вищу міцність ($92,7 \text{ МПа}$), ніж GLT ($86,1 \text{ МПа}$) та сосна ($83,4 \text{ МПа}$), що пояснюється більш однорідною структурою і технологією виробництва.

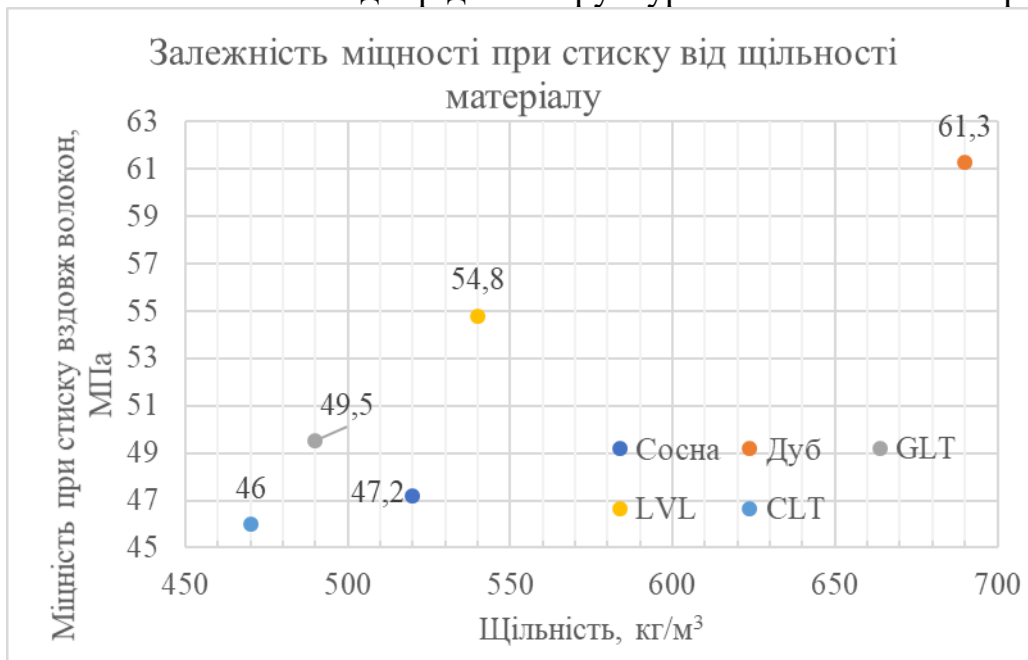


Рис. 4. Залежність міцності при статичному згині від щільності деревини

Міцність при стиску має тенденцію до зростання зі збільшенням модуля пружності (E) (рис. 5). Найвищі значення обох параметрів спостерігаються у дуба, тоді як CLT та сосна демонструють нижчі показники. Це підтверджує, що жорсткість матеріалу є одним із ключових факторів його здатності витримувати стискаючі навантаження.

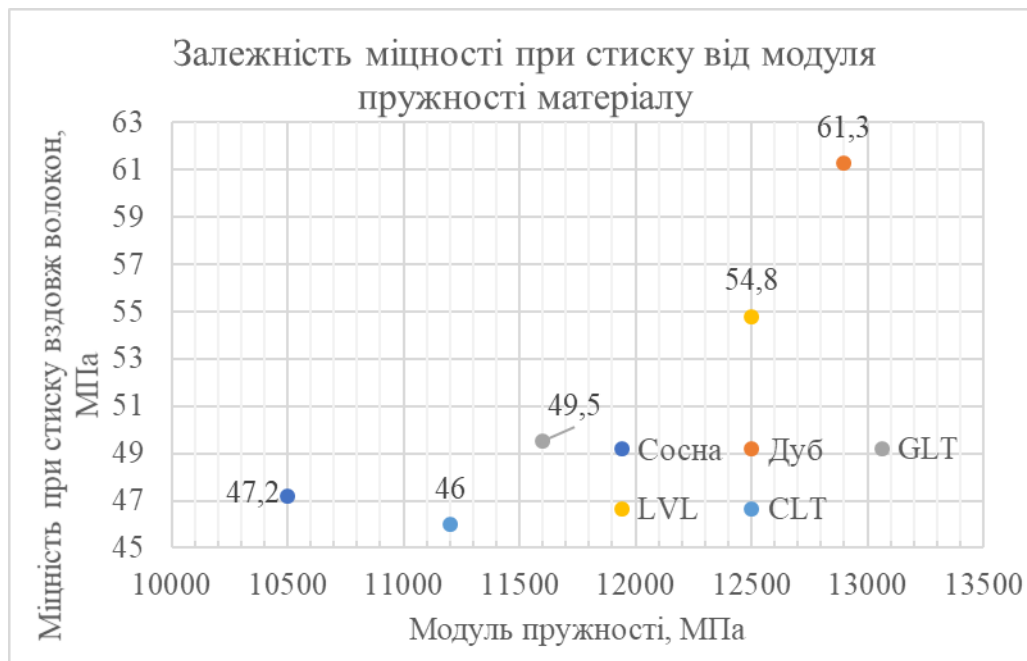


Рис. 5. Залежність міцності при стиску від модуля пружності матеріалу

Міцність при статичному згині тісно корелює з модулем пружності (рис. 6). LVL і дуб, маючи високий E, показують і найвищі значення міцності при статичному згині. Матеріали з меншим модулем пружності (GLT, CLT) мають нижчі показники, навіть при близькій до сосни щільності.

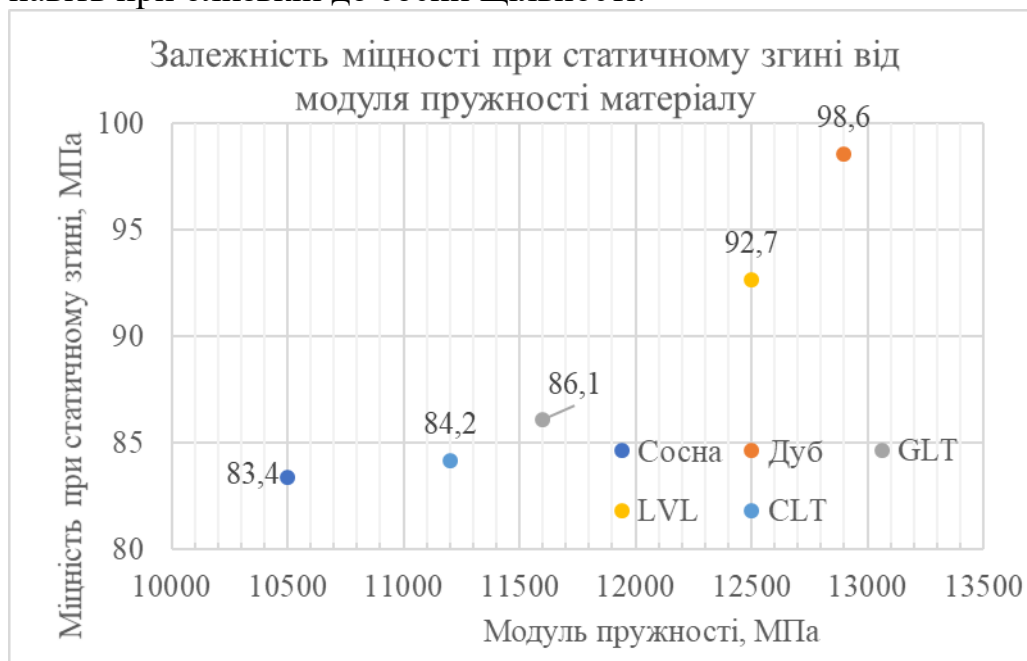


Рис. 6. Залежність міцності при статичному згині від модуля пружності матеріалу

Проведений кореляційний аналіз показав:

- коефіцієнт кореляції між щільністю і міцністю при стиску $r=0,82$;

- коефіцієнт кореляції між модулем пружності і міцністю при статичному згині $r=0,88$;
- сильний негативний зв'язок між вологістю та міцністю ($r=-0,76$).

Це підтверджує, що щільність та модулі пружності є визначальними факторами для прогнозування міцності конструкцій, тоді як вологість виступає ключовим дестабілізуючим чинником.

На основі експериментальних даних розроблено багатофакторну регресійну модель прогнозування міцності при статичному згині ($\sigma_{\text{згину}}$) у залежності від щільності (ρ), модуля пружності (E) та вологості (W).

$$\sigma_{\text{згину}} = 0,052 \cdot \rho + 0,0041 \cdot E - 0,73 \cdot W + 12,6.$$

Коефіцієнт детермінації $R^2=0,91$ свідчить про високу точність моделі.

Порівняння матеріалів за ефективністю. За співвідношенням «міцність/щільність» найвищі результати показав LVL ($0,170 \text{ МПа} \cdot // \text{ м}^3/\text{кг}$), що робить його найбільш раціональним вибором для конструкцій, де важлива комбінація малої ваги та високої несучої здатності.

Обговорення результатів. Аналіз отриманих залежностей. Результати досліджень підтвердили тісний взаємозв'язок між фізико-механічними властивостями деревинних матеріалів та міцнісними характеристиками дерев'яних конструкцій. Найсильніший прямий зв'язок встановлено між щільністю та міцністю при стиску вздовж волокон ($r=0,82$), що узгоджується з даними науковців, де також підкреслюється важливість щільності як інтегрального показника якості деревини. Високе значення коефіцієнта кореляції між модулем пружності та міцністю при статичному згині ($r=0,88$) свідчить про те, що жорсткість матеріалу визначає його здатність протидіяти деформаціям при згинальних навантаженнях. Це особливо важливо при проектуванні елементів балкового типу, де саме модуль пружності впливає на величину прогинів і вібрацій.

Отримані результати підтвердили, що збільшення вологості понад 15-20% призводить до суттєвого зниження міцнісних характеристик деревини (на 18-25%). Це пояснюється зменшенням зчеплення між клітинними стінками деревини та розм'якшенням лігніну й геміцелюлози, що знижує опір зсуву волокон. Подібні тенденції описані у дослідженнях інших вчених, проте у цій роботі отримані кількісні рівняння для прогнозування цього впливу. Порівняльний аналіз показав, що інженерні деревинні матеріали (LVL, GLT) демонструють меншу варіативність властивостей і кращу стабільність міцності при зміні вологості порівняно з суцільною деревиною. Це пов'язано з технологією виробництва, яка забезпечує рівномірність структури та усуває дефекти (сучки, перекося волокон), притаманні натуральній деревині. Найвищий показник «міцність/щільність» ($0,170 \text{ МПа} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$) у LVL підтверджує його ефективність для конструкцій, де критично важлива комбінація малої маси та високої несучої здатності.

Отримані залежності загалом збігаються з результатами, наведеними у працях дослідників, однак відрізняються вищою точністю моделі прогнозування за рахунок урахування одразу трьох факторів – щільності, модуля пружності та вологості. Раніше більшість моделей будувалася лише на основі одного або двох параметрів, що знижувало точність розрахунків. Отримані дані можуть бути безпосередньо використані при проектуванні дерев'яних конструкцій: для швидкої оцінки міцності матеріалів у польових умовах достатньо визначити щільність і воло-

гість, після чого скористатися побудованою регресійною моделлю; при виборі матеріалів для умов з високою або змінною вологістю перевагу слід надавати LVL та GLT; розроблені залежності можуть бути інтегровані у проектні програми (SCAD, LIRA-SAPR) для підвищення точності розрахунків. Дослідження проводилося на зразках стандартних розмірів, що не повністю відображає реальні умови роботи великих конструкційних елементів. У подальшому планується розширити експеримент на повномасштабні елементи, а також дослідити вплив циклічних та ударних навантажень у поєднанні зі зміною вологості.

Практичні рекомендації. На основі проведеного дослідження сформульовано такі рекомендації для проєктувальників, будівельних організацій та виробників деревинних конструкційних матеріалів.

Вибір матеріалів залежно від умов експлуатації:

- Сухі внутрішні приміщення (вологість < 12%) – допустимо застосовувати як суцільну деревину (сосна, ялина, дуб), так і інженерні деревинні матеріали (GLT, LVL, CLT).
- Змінна або підвищена вологість (12-20%) – перевагу слід надавати LVL та GLT завдяки їх стабільності та меншій чутливості до змін вологості.
- Вологе середовище (> 20%) – необхідне попереднє антисептування та використання матеріалів з гідрофобними просоченнями, а також конструктивний захист (захисні облицювання, вентиляція).

Критерії оцінки придатності матеріалу. При прийнятті рішення про використання деревинного матеріалу в конструкції рекомендовано оцінювати:

1. Щільність – як інтегральний показник потенційної міцності;
2. Вологість – для оцінки поточної здатності матеріалу витримувати навантаження;
3. Модулі пружності (E, G) – для прогнозування деформацій;
4. Міцність при стиску та статичному згині – як головний показник несучої здатності.

Використання регресійної моделі. Для швидкої оцінки міцності при статичному згині ($\sigma_{згину}$) у польових умовах можна застосувати отриману в дослідженні модель:

$$\sigma_{згину}=0,052 \cdot \rho + 0,0041 \cdot E - 0,73 \cdot W + 12,6 ,$$

де: ρ – щільність (кг/м³), E – модуль пружності (МПа), W – вологість (%).

Ця модель забезпечує точність прогнозу на рівні $R^2=0,91$.

Конструктивні заходи для підвищення міцності:

- Мінімізувати вплив змін вологості шляхом використання вентиляційних зазорів та захисних покриттів.
- Виключати елементи з дефектами (сучки, тріщини, перекіс волокон) у найбільш навантажених зонах.
- При проєктуванні балок і ферм застосовувати матеріали з найвищим відношенням «міцність/щільність» (LVL, дуб).

Для виробників дерев'яних конструкцій:

- Проводити обов'язковий контроль щільності та вологості партій матеріалів.
- Маркувати матеріали з вказанням основних фізико-механічних характеристик для спрощення їх вибору проєктувальниками.
- Впроваджувати технології глибокої гідрофобізації для підвищення довговічності конструкцій у вологих умовах.

Висновки:

1. Встановлено, що фізико-механічні властивості деревинних матеріалів мають визначальний вплив на міцнісні характеристики дерев'яних конструкцій. Найбільшу кореляцію з міцністю при стиску та статичному згині виявлено для щільності ($r=0,82$) та модуля пружності ($r=0,88$), тоді як вологість має сильний негативний вплив ($r=-0,76$).
2. Визначено, що підвищення вологості деревини з 10% до 20% знижує міцність при стиску вздовж волокон на 18-25% залежно від типу матеріалу, причому найбільш чутливими виявилися CLT та суцільна сосна, а найстійкішим – LVL.
3. Побудовано багатофакторну регресійну модель прогнозування міцності при статичному згині ($\sigma_{\text{згину}}$) на основі щільності, модуля пружності та вологості забезпечує високу точність прогнозу ($R^2=0,91$) та може застосовуватися у практичному проектуванні.
4. З'ясовано, що сучасні конструкційні деревинні матеріали (LVL, GLT) демонструють вищу стабільність міцнісних характеристик і меншу варіативність властивостей у порівнянні з суцільною деревиною, що робить їх пріоритетними для конструкцій у змінних кліматичних умовах.
5. Надано рекомендації щодо вибору матеріалів і конструктивних рішень, сформульовані за результатами дослідження, дозволяють підвищити надійність і довговічність дерев'яних конструкцій, а також оптимізувати процес проектування.
6. Обґрунтовано доцільність подальших досліджень, які необхідно спрямувати на випробування повномасштабних елементів у реальних умовах експлуатації та на вивчення впливу комбінованих навантажень у поєднанні зі зміною вологості та температури.

References

1. **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).
2. **Gayda S.V.** (2000) Матеріали для виготовлення виробів з деревини / Materials for the Production of wood Productss. – Lviv: BMC. – 160 p., (in Ukrainian).
3. **Gayda S.V.** (2000). Визначення стійкості та міцності вертикальних стінок корпусних меблевих виробів [Determination of stability and strength of vertical walls of case furniture products]. Scientific Bulletin of UNFU 10.3:127-129. (in Ukrainian).
4. **Gayda S.V.** (2000). Особливості розрахунку корпусних виробів на міцність [Peculiarities of strength calculation of hull products]. Scientific Bulletin of UNFU 10.2:150-154. (in Ukrainian).
5. **Gayda S.V.** (2001). Раціональне конструювання виробів з деревини / Rational constructing of wood Productss. Lviv: BMC. – 93 p. (in Ukr.).
6. **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>
7. **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>
8. **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).
9. **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.
10. **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>

11. **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.
12. **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.
13. **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,.
14. **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).
15. **Gayda S.V.** (2016). Ecological and technological aspects of recycling post-consumer wood for production compacted materials]. *Lesnoy vestnik / Bulletin of MSFU* 20(3).15-22.
16. **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.
17. **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>
18. **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.
19. **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>
20. **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>.
21. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). *Bulletin of KhNTUA* 197:3-9, (in Ukrainian).
22. **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).
23. **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>
24. **Gayda S.V.** (2023). State and analysis of the dynamics indicators of the production volume of the woodworking and furniture industry. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 4-19 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234901>
25. **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>
26. **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>.
27. **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>.
28. **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>
29. **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>.

30. **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>
31. **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>
32. **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>
33. **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.
34. **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.
35. **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.
36. **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>
37. **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.
38. **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>
39. **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>
40. **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).
41. **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>
42. **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>
43. **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.
44. **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.
45. **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>
46. **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>
47. **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>

48. **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>
49. **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).
50. **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>
51. **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>
52. **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>
53. **Гайда С.В.** Визначення стійкості та міцності вертикальних стінок корпусних меблевих виробів. *Науковий вісник: зб. наук.-техн. праць.* – Львів: УкрДЛТУ – 2000, 10.3 – С. 127-129.
54. **Гайда С.В.** Визначення характеристик столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез доповідей МНПК (05-06.06.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 118-120. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17079555>
55. **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.
56. **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>
57. **Гайда С.В.** Ергономічні основи конструювання виробів з деревини (функціональні розміри на елементи виробів) // Конспект лекцій. – Львів: НЛТУ України, 2025. – 59 с.
58. **Гайда С.В.** З'єднання елементів у виробах з деревини // Конспект лекцій з практичними рекомендаціями. – Львів: НЛТУ України, 2025. – 71 с.
59. **Гайда С.В.** Практичні задачі з курсу «Конструювання виробів з деревини» (для практичних занять студентів спеціальності 187 «Деревообробні та меблеві технології») / Методичні вказівки. – Львів: НЛТУ України, 2025. – 25 с.
60. **Гайда С.В.** Реалізація принципів циркулярної економіки в лісовому секторі: матеріали тез доповідей НПК (м. Харків, 24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 110-112. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
61. **Гайда С.В.** Розрахунок жорсткості горизонтальних стінок корпусних меблевих виробів. *Науковий вісник: зб. наук.-техн. праць.* – Львів: УкрДЛТУ. – 2001, вип. 11.2 – С. 35-37
62. **Гайда С.В.** Розрахунок міцності та деформативності щитових елементів виробів з деревини / Методичні вказівки для лабораторних робіт з курсу технології виробів з деревини. – Львів: УкрДЛТУ, 2002. – 34 с.
63. **Гайда С.В.** Технології вживаної деревини як дієві механізми для реалізації принципів циркулярної економіки: матеріали НПК (05-06.06. 2025). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 137-139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17079555>
64. **Гайда С.В.** Шорсткість поверхні деревини. Конспект лекцій. - Львів, 2025. – 52 с.
65. **Гайда С.В., Кушніт А.С.** Система «Допуски та посадки» у деревообробленні (курс «Конструюванні виробів з деревини») // Методичні вказ. – Львів: НЛТУ України, 2025. – 38 с.
66. **Гайда С.В., Кшивецький Б.Я., Войтович І.Г. Прокопович Б.В.** Тлумачний словник з деревооброблення. – 2002. – 280 р.
67. **Гайда С.В., Лесів Л.Е.** Міцність комбінованих столярних плит із вживаної деревини ялиці: матеріали тез доповідей НПК (24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 128-130. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
68. **Гайда С.В., Лесів Л.Е.** Побудова моделі міцності зрощених заготовок із вживаної деревини ялиці: матеріали тез НПК (м. Харків, 7-8 жовтня 2024 р.). – Харків : ДБТУ, 2024. – С. 187-189. <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/conf-07-08-10-24-mater.pdf>

69. **Гайда С.В., Лесів Л.Е.** Порівняльний аналіз комбінованих столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез доповідей XIV Міжнародної НПК (м. Чернігів, 23-24 травня 2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 215-217.
70. **Гайда С.В., Медвідь Л.В.** Дослідження міцності при статичному згині столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез доповідей 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>
71. **Гайда С.В., Медвідь Л.В.** Міцність звичайних столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез доповідей XIV Міжнародної НПК (м. Чернігів, 23-24 травня 2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 213-214.
72. **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>
73. **Гайда С.В., Подібка Т.І.** Вплив товщини рейок на формостійкість меблевих щитів: Матеріали тез XV МНПК (22-23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.1. – С. 184-186. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
74. **Гайда С.В., Подібка Т.І.** Забезпечення площинності меблевих щитів із бука європейського: матеріали тез всеукраїнської НПК (24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 137-139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
75. **Гайда С.В., Подібка Т.І.** Формостійкість меблевих щитів із сосни звичайної: матеріали тез доповідей XIV МНПК (23-24.05.24). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 211-212.
76. **Гайда С.В., Удовиський 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/>
77. **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>
78. **Гайда, С.В.** Вимоги до меблевих виробів та правила їх конструювання. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2005. – Вип. 1. – С. 46-56.
79. **Гайда, С.В.** Класифікація та застосування «Нового дерева» – плит МДФ. Woodbusiness. – Київ: КНФ. – 2003. – Вип. 4. – С. 24-32.
80. **Гайда, С.В.** Первинне механічне оброблення деревинних заготовок. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 6 – С. 51-60.
81. **Гайда, С.В.** Перспективні технології повздовжнього зрощування. Woodbusiness. – Київ: КНФ. – 2004. – Вип. 2. – С. 34-45.
82. **Гайда, С.В.** Поперечне зрощування деревини. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2005. – Вип. 3. – С. 46-51.
83. **Гайда, С.В.** Прогресивні плитні матеріали MDF та OSB. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 1 – С. 30-32.
84. **Гайда, С.В.** Прогресивні технології поздовжнього зрощування деревини. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 5 – С. 10-19.
85. **Гайда, С.В.** Сучасні технології та обладнання для зрощування. Woodbusiness. – Київ: КНФ. – 2005. – Вип. 2. – С. 32-41.
86. **Гайда, С.В.** Сучасні технології дерев'яного будинкобудування. Woodbusiness. – Київ: КНФ. – 2003. – Вип. 4. – С. 33-44.
87. **Гайда, С.В.** Що нам важко стілець зробити? Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 3 – С. 44-52.
88. **Гайда С.В.** Матеріали для виготовлення виробів з деревини: Навч. пос. – Л.: ВМС, 2000. – 160 с.
89. **Гайда, С.В., Бринзей Л.М.** Особливості визначення деформатичності полиць для кухонних тумб. Матеріали 54-ої Н-ПК НЛТУ України (11-13 квітня 2002 р.). – Львів : НЛТУ України, 2002. – С. 44-48.
90. **Гайда, С.В., Гучко Р.І.** Визначення міцності столярних стільців. Матеріали 54-ої Н-ПК НЛТУ України (11-13 квітня 2002 р.). – Львів : НЛТУ України, 2002. – С. 36-39.

91. 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>
92. 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/>
93. 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>
94. 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>
95. 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/>

UDC 674.8

Post-graduate student Yu.O. Kozak – UNFU

Building a regression model for predicting the strength of wooden structures based on the influence of density, moisture content and elastic modulus

The article examines the regularities of the influence of physical and mechanical properties of main structural wood materials on the strength characteristics of timber structures. It was found that density ($r=0.82$) and modulus of elasticity ($r=0.88$) have the highest correlation with compressive and bending strength, while moisture content has a strong negative effect ($r=-0.76$). Increasing moisture from 10% to 20% reduces compressive strength along the grain by 18-25%, with CLT and solid pine being the most sensitive, and LVL the most resistant. A multiple regression model for predicting bending strength based on density, modulus of elasticity, and moisture content ($R^2=0.91$) demonstrates high accuracy and is suitable for practical design use. Modern engineered wood products (LVL, GLT) exhibit more stable strength parameters and lower variability compared to solid wood, making them effective for use under variable climatic conditions. Recommendations for material selection will enhance the reliability and durability of timber structures. The need for further research on full-scale elements under real operating conditions and the influence of combined loads with changing moisture and temperature is substantiated.

Keywords: wood, strength, moisture content, density, modulus of elasticity, LVL, GLT, CLT, structural materials, wooden structures.



*Директор ТЗОВ «Фортуна-меблі» В.В. Киянка¹;
проф. С.В. Гайда², д-р техн. наук – НЛТУ України*

РОЗРОБЛЕННЯ ШЛЯХІВ ВИКОРИСТАННЯ ДЕРЕВИННИХ ЗАЛИШКІВ ТА ВІДХОДІВ ВІД ПЕРЕРОБЛЕННЯ ДЕРЕВИННИХ ТА КОМПОЗИТНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ВИРОБНИЧОЇ ДІЯЛЬНОСТІ МЕБЛЕ- ВОГО ПІДПРИЄМСТВА ТЗОВ «ФОРТУНА-МЕБЛІ»

Розглянуто проблему утворення та повторного використання деревинних залишків і відходів композитних матеріалів у меблевому виробництві в контексті принципів циркулярної економіки. Мета дослідження – розробити та науково обґрунтувати ефективні маршрути перероблення відходів (механічне повторне використання, панельні матеріали, біоенергетика) з урахуванням економічних та екологічних критеріїв. Методика включає облік потоків за 2022-2024 рр., класифікацію відходів (тверді обрізки; м'які фракції – тирса, стружка), побудову матеріально-балансової моделі з матрицею розподілу, перерахунки об'єм↔маса з урахуванням щільності та вологості, економічне моделювання (доходи/витрати/уникнені платежі за полігон), енергетичну та вуглецеву оцінку (LHV, фактори викидів), аналіз чутливості. Показано стале зниження загального обсягу відходів з 54,80 м³ (2022) до 30,48 м³ (2024) (–44%), з найбільшим внеском твердих обрізків (з 35,23 до 19,58 м³). Запропонована схема розподілу у 2024 р. забезпечила ≈95% відведення від полігону (28,95 м³): пріоритет механічного повторного використання обрізків (євробрус/піддони/комплектуючі), спрямування дрібних фракцій на біопаливо та як сировину для ДСП/MDF. Сумарний економічний ефект базового сценарію становить ≈0,25 млн грн/рік (у т.ч. маржа напрямів ≈0,23 млн грн та уникнені витрати на полігон ≈23 тис. грн). Енергетичний еквівалент біопалива – ≈11,35 МВт·год/рік; відвернені викиди CO₂ – ≈2,29 т (заміщення природного газу) або ≈3,86 т (вугілля). Наукова новизна полягає у поєднанні каскадного використання деревини з інтегрованою матеріально-балансовою моделлю на рівні підприємства, що узгоджує технологічні, економічні та екологічні показники. Практична значущість – у наданні відтворюваного інструментарію для управління відходами, планування потужностей та впровадження КРІ ресурсоефективності.

Ключові слова: меблеве виробництво; деревинні залишки; композитні відходи; повторне використання; ДСП; MDF; ресурсоефективність; відведення від полігону; вживана деревина, циркулярна економіка, технологія, утилізація, біопаливо, CO₂.

Вступ. Сучасний розвиток меблевої промисловості характеризується інтенсивним використанням деревини та композитних конструкційних матеріалів, що супроводжується значним утворенням виробничих відходів. За оцінками, частка залишків деревини й композитів у меблевому виробництві може сягати 30–40 % [87] від загального обсягу використаної сировини, що призводить до підвищення собівартості продукції та створює додаткове екологічне навантаження на довкілля. Неефективне використання цих ресурсів спричиняє перевитрати матеріалів, зростання витрат на їх утилізацію, а також посилює проблему забруднення навколишнього середовища [9, 32, 56-58].

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю впровадження ресурсозберігаючих технологій та пошуку шляхів повторного використання деревинних

¹ Киянка Володимир Володимирович – директор ТЗОВ «Фортуна-меблі», вул. П'ясецького, 15, Львів, Україна. Тел.: +38-067-313-31-90. E-mail: vkyyanka@gmail.com

² Гайда Сергій Володимирович – академік Лісівничої академії наук України, доктор технічних наук, професор кафедри технологій меблів та виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-238-45-04, +38-067-791-25-22. E-mail: serhiy.hayda@nltu.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7468-5661> ResearcherID: ABB-1636-2021 Scopus/authorID=57221587964

залишків. Це відповідає сучасним тенденціям розвитку «зеленої економіки» та принципам циркулярної економіки, що передбачають мінімізацію відходів і максимальне повернення матеріалів у виробничий цикл. Розроблення та застосування інноваційних підходів до перероблення деревинних і композитних відходів дає змогу підвищити ефективність діяльності меблевих підприємств, знизити витрати та сформувати конкурентні переваги на ринку.

Проблемність дослідження полягає в тому, що на практиці більшість меблевих підприємств не мають системного підходу до управління відходами. Залишки деревини та композитних матеріалів здебільшого вивозяться на полігони або спалюються, що не лише не приносить економічної вигоди, але й посилює екологічні ризики. Водночас потенціал цих відходів як вторинної сировини або енергетичного ресурсу використовується недостатньо. Відсутність чітких методичних рекомендацій і науково обґрунтованих рішень щодо організації ефективної системи перероблення деревинних відходів створює потребу у проведенні комплексних досліджень.

Таким чином, постає завдання розроблення науково обґрунтованих шляхів використання залишків деревини та композитних відходів меблевого виробництва, що дозволить поєднати економічні інтереси підприємства із завданнями збереження навколишнього природного середовища.

Метою дослідження є розроблення та наукове обґрунтування ефективних шляхів використання деревинних залишків і відходів, що утворюються внаслідок перероблення деревинних та композитних конструкційних матеріалів у виробничій діяльності меблевого підприємства, з орієнтацією на підвищення ресурсоефективності та зменшення антропогенного впливу на довкілля.

Об'єктом дослідження виступають деревинні та композитні відходи, що виникають у процесі виробничої діяльності меблевого підприємства.

Предметом дослідження є технологічні та організаційні підходи до повторного використання і перероблення залишків деревини та відходів композитних конструкційних матеріалів у меблевому виробництві.

Завдання дослідження: Провести аналіз складу, структури та обсягів відходів, характерних для меблевого підприємства. Узагальнити сучасні методи та технології утилізації й повторного використання деревинних і композитних залишків. Визначити перспективні напрями застосування відходів для виготовлення вторинних матеріалів, паливних ресурсів та допоміжних конструкційних елементів. Розробити рекомендації щодо впровадження технологій перероблення відходів у межах меблевого виробництва. Виконати оцінку економічної ефективності та екологічної доцільності запропонованих рішень.

Гіпотеза дослідження. Рациональне використання залишків деревини та відходів композитних матеріалів меблевого виробництва шляхом їх вторинної переробки забезпечує зниження витрат на сировину й утилізацію, сприяє підвищенню екологічної безпеки та створенню додаткових продуктів з високою доданою вартістю [1, 8, 26, 36, 55].

Наукова новизна:

- Удосконалено підходи до класифікації деревинних та композитних відходів з урахуванням можливостей їх повторного використання у меблевому виробництві [12, 15, 17, 21, 28, 34, 45, 56, 57, 58, 78, 81, 82].

- Запропоновано комплексне рішення щодо організації системи перероблення відходів на підприємстві, яке поєднує технологічні, економічні та екологічні аспекти, і принципи циркулярної економіки [27, 28, 49, 60, 61, 63, 64].
- Обґрунтовано доцільність застосування деревинних залишків як альтернативної сировини для виготовлення плитних матеріалів і як джерела енергетичних ресурсів [22, 7, 11, 12, 13, 50].
- Встановлено взаємозв'язок між ефективністю організаційних заходів із перероблення відходів та економічними результатами виробництва.

Практична значимість. Результати дослідження можуть бути використані меблевими підприємствами для оптимізації виробничих процесів, зниження витрат на утилізацію відходів і закупівлю первинної сировини, а також для формування екологічно орієнтованої стратегії розвитку [9, 16, 26, 38, 47, 53, 85]. Запропоновані рекомендації сприятимуть підвищенню конкурентоспроможності підприємств на ринку та можуть бути адаптовані у суміжних галузях деревообробної та будівельної промисловості [78, 84].

Огляд літератури. Проблематика використання деревинних залишків та відходів виробництва знайшла відображення у працях як вітчизняних, так і зарубіжних дослідників. У наукових роботах з деревообробки та меблевого виробництва значна увага приділяється питанням зменшення кількості відходів та їх повторного використання [32, 35, 37, 39, 46, 47, 51, 53, 54, 65, 83, 86, 88]. Зокрема, доведено, що вторинна переробка деревинних залишків може забезпечити до 25–30 % додаткової економії ресурсів підприємства [1, 8, 26, 36, 55]. Дослідники підкреслюють, що деревинні відходи мають високу теплотворну здатність, що робить їх перспективними для виробництва біопалива [5].

Окремі автори розглядають можливості використання залишків деревини у виробництві плитних матеріалів: столярної плити [19, 25, 26, 29, 31, 40, 43, 44, 48, 68, 70], меблевого щита [21, 42, 52], ДСП [12, 15, 28, 34, 56, 57, 58] та MDF [1, 45, 81]. Зазначається, що застосування подрібнених деревинних фракцій у композиції з полімерними та неорганічними в'язучими дозволяє отримати нові композитні матеріали з покращеними експлуатаційними характеристиками [78, 84]. Водночас вказується на необхідність удосконалення методик дослідження [3, 14, 16, 26, 69] та технологій сортування та підготовки відходів до перероблення [4, 8, 10, 14, 15, 20, 23, 30, 62, 66, 67, 69, 74, 79, 80], адже саме ці етапи визначають якість [5, 6, 8, 17, 22, 34, 35, 38, 44, 71, 72, 73, 75, 77, 84, 87] і вартість виробу [1, 8, 26, 36, 55].

Разом із тим, аналіз сучасних публікацій свідчить про недостатню увагу до системного підходу щодо інтеграції технологій повторного використання деревинних відходів вживаної деревини [10, 18, 24, 26, 33, 37, 41, 46, 47, 59, 73] у діяльність меблевих підприємств. Переважна більшість досліджень зосереджується або на вузьких технологічних аспектах утилізації, або на окремих видах вторинної продукції, залишаючи поза увагою комплексне поєднання економічних, екологічних та організаційних чинників. Це створює наукову прогалину, заповнення якої і становить мету даного дослідження.

Методика дослідження включає кілька основних компонентів:

1. **Дизайн і межі системи:** а) об'єкт: залишки та відходи, що утворюються під час перероблення деревини (дуб, бук) та композитних матеріалів (ДСП, фанера, MDF) на заготовки меблевого підприємства; б) категорії потоків: Залишки тверді

– обрізки (масив, фрагменти плит); Відходи м'які – тирса; Відходи м'які – стружка; системні межі: від моменту утворення відходів у цехах (розкрій/фрезерування/шліфування) до їх перероблення в продукцію другого циклу (євробрус/піддони, стружка для ДСП, волокно для MDF, біопаливо, адсорбенти) або до утилізації. Логістика поза територією підприємства не включена (за потреби може оцінюватись окремо); Період спостереження: 2022-2024 рр., агрегування – річне (з внутрішніх місячних зведень).

2. **Збір первинних даних:** а) облік обсягів (м^3) : джерела: маршрутні листи/накладні внутрішнього переміщення відходів, журнали вивозу, зведення майстрів цехів; періодичність: щозміни $\rightarrow$ зведення щомісяця $\rightarrow$ консолідація за рік; б) контрольні зважування/вимірювання: раз на квартал виконуються контрольні зважування (т) для м'яких фракцій і обміри (м^3) для твердих обрізків; вологість визначається сушильним методом на лабораторній установці; результати фіксуються як масова вологість w , %; в) сортування для класифікації: на кожній ділянці встановлені окремі контейнери: «Обрізки», «Тирса», «Стружка»; змішування неприпустиме; композитні фрагменти (ламінація, HPL) відносять до «Обрізків» або «Стружки» залежно від фракції.

3. **Перерахунки та нормалізація:** а) корекція на вологість (для переходу до умов «absolutely dry» при енергорозрахунках): $m_0 = (m_{\text{as-is}} \cdot (100 - w)) / 100$; б) перехід $\text{м}^3 \rightarrow \text{т}$ (для економіки/енергетики) через середню щільність ρ : $m = V \cdot \rho / 1000$; Прийняті усереднені значення (для базового сценарію): $\rho_{\text{обрізки}} = 650 \text{ кг/м}^3$ (дуб/бук/плити), $\rho_{\text{тирса}} = 200 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{стружка}} = 100 \text{ кг/м}^3$. За наявності власних вимірів ці параметри замінюються.

4. **Енергетичний потенціал** біопалива визначався за формулою: $E (\text{МВт/год}) = m_0 (\text{т}) \times \text{LHV} (\text{МВт/год/т})$. У розрахунках використано $\text{LHV} = 4,7 \text{ МВт/год/т}$ для сухих гранул/брикетів. Для іншої вологості застосовується поправка $\text{LHV}(w)$.

5. **Відвернені викиди CO_2** при заміщенні енергоносіїв: $\text{CO}_2^{\text{avoid}} = E \cdot \text{EF}$, де EF фактор викидів (наведено два сценарії: природний газ $0,202 \text{ т CO}_2/\text{МВт/год}$, вугілля $0,34 \text{ т CO}_2/\text{МВт/год}$).

6. **Показник відведення від полігону:** $D_{\text{landfill}} = V_{\text{повторно використано}} / V_{\text{усього}} \times 100\%$.

7. **Модель розподілу потоків (матеріальний баланс):** Крок 1. Для кожної категорії k (обрізки/тирса/стружка) визначити обсяг V_k за рік; Крок 2. Застосувати матрицю часток $\alpha_{k \rightarrow j}$ (частка потоку k , скерована в напрям j : євробрус/піддони, ДСП, MDF, біопаливо, адсорбенти, втрати); Крок 3. Розрахувати обсяги за напрямками: $V_j = \sum_k (V_k \cdot \alpha_{k \rightarrow j})$, $m_j = V_j \cdot \rho_k / 1000$; Крок 4. Перевірка закриття балансу: $\sum_j V_j = \sum_k V_k$ (допустиме відхилення $\leq 2\text{--}5\%$). У дослідженні використано матрицю α , сформовану за технологічною придатністю: для обрізків – пріоритет механічного повторного використання (євробрус/піддони), для дрібних фракцій – біопаливо та щитові матеріали.

8. **Економічні розрахунки**

А) **Дохід/еквівалент за напрямом j :** $R_j = \{V_j \cdot P_j (\text{м}^3)\}$, для євробрусу/піддонів; $R_j = \{m_j \cdot P_j (\text{т})\}$, для ДСП/MDF/біопалива/адсорбентів.

Б) **Витрати перероблення C_j :** аналогічно (на 1 м^3 або 1 т), включаючи енергію, працю, витратні матеріали. Амортизацію обладнання можна враховувати окремо.

В) **Уникнені витрати полігону:** $C_{\text{landfill}}^{\text{avoid}} = (V_{\text{усього}} - V_{\text{втрати}}) \cdot T_{\text{полігон}} (\text{м}^3)$.

Г) Економічний ефект (річний): $E_{econ} = \sum_j (R_j - C_j) + C_{landfill}^{avoid}$.

Д) Інтенсивність відходоутворення: $I = V_{усього} / Q_{продукції}$ (m^3/m^3 або $m^3/вириб$) (за наявності даних про випуск продукції).

9. Екологічна оцінка: енергетичний ефект – за формулами з п.3; відвернені викиди CO_2 – для двох базових сценаріїв заміщення (газ/вугілля). за потреби додається сценарій «електроенергія з мережі»; відведення від полігону – частка обсягу, спрямована на повторне використання; додаткові показники (за наявності): скорочення формальдегідних викидів при зменшенні спалювання композитів; питомий показник CO_2 -екв. на $1 m^3$ продукції.

10. Статистична обробка і трендовий аналіз: динаміка: розрахунок річних темпів зміни для кожної категорії: $g = (V_t - V_{t-1}) / V_{t-1} \times 100\%$; невизначеність: для щільностей і вологості задаються інтервали (наприклад, $\pm 10-20\%$). Оцінка чутливості: варіювання ρ , w , P_j , $T_{полігон}$ на $\pm 20\%$ і відстеження впливу на E_{econ} та CO_2^{avoid} ; валідація: перевірка закриття матеріального балансу (відхилення $\leq 5\%$), звірка «знизу-вгору» (сумування по цехах) та «зверху-вниз» (складські/логістичні записи).

11. Якість даних та контроль (QA/QC): подвійний запис (цех $\rightarrow$ склад), щомісячне звірення; квартальні контрольні зважування і визначення вологості. Фотофіксація та збереження накладних/журналів; внутрішній аудит раз на рік: перерахунок вибірових місяців незалежним інженером.

12. Інструменти і відтворюваність: розрахункові файли: Excel-моделі з параметрами (цінові/технологічні коефіцієнти), додатково Python-скрипти для побудови діаграм і схем потоків; візуалізація: блок-схема матеріальних потоків (кольорова і монохромна для друку), таблиці економіки та екології; Sankey-діаграма – за потреби; репродукція: достатньо підставити річні обсяги V_k , виміряні ρ , w та оновити ціни – запропонована модель автоматично перерахує всі підсумки.

13. Обмеження методики: для композитів (ДСП/MDF/фанера) при енергетичному використанні можливі додаткові екологічні обмеження (вміст смол/покриттів); у базовому сценарії композити пріоритетно спрямовуються в механічне або щитове повторне використання; щільність та вологість мають значну варіабельність; рекомендується щоквартальне оновлення параметрів; економіка чутлива до ринкових цін на гранули/піддони та тарифів полігону – обов'язково проводити аналіз чутливості.

Результати дослідження. У ході дослідження встановлено, що у виробничому процесі меблевого підприємства утворюються різнотипні відходи деревини та композитних матеріалів. Оцінка динаміки утворення залишків та відходів від перероблення деревинних (дуб, бук) та композитних матеріалів (ДСП, фанера, MDF) на заготовки протягом 2022-2024 рр. на меблевому підприємстві наведена у табл. 1.

Таблиця 1. Динаміка накопичення деревинних залишків та відходів від перероблення деревинних та композитних конструкційних матеріалів, m^3

Різновиди залишків та відходів	2022	2023	2024
Річні обсяги	54,80	51,46	30,48
Залишки тверді – обрізки	35,23	34,17	19,58
Відходи м'які – тирса	11,92	12,58	6,65
Відходи м'які – стружка	7,65	4,71	4,24

Порівняльний аналіз загальної кількості відходів та залишків на підприємстві показав зменшення з 54,80 м³ у 2022 р. до 30,48 м³ у 2024 р., що свідчить про загальне покращення ефективності управління відходами та оптимізації виробничих процесів протягом аналізованого періоду. Кількість твердих залишків – обрізків знизилася з 35,23 м³ у 2022 р. до 19,58 м³ у 2024 р. Незначне зменшення у 2023 р. (на ~3%) може бути пов'язане з незначними покращеннями в процесах обробки, а значне зниження у 2024 р. (~43%) свідчить про суттєве вдосконалення методів обробки та використання матеріалів. Відходи тирси спочатку зазнали невеликого зростання з 11,92 м³ у 2022 р. до 12,58 м³ у 2023 р. (~6% збільшення), після чого значно знизилися до 6,65 м³ у 2024 р. (~47% зменшення), що є результатом оптимізації розкрійних процесів. Кількість відходів стружки знизилася з 7,65 м³ у 2022 р. до 4,24 м³ у 2024 р. Зниження на ~38% з 2022 по 2023 рік та подальше помірне зменшення (~10%) з 2023 по 2024 рік вказують на ефективне управління цим типом відходів та можливість їх повторного використання. Ефективне управління залишками та відходами при переробці деревинних та композитних конструкційних матеріалів є критично важливим для меблевих підприємств. Оптимізація цього процесу дозволяє знизити витрати, покращити екологічну стійкість підприємства та підвищити загальну ефективність виробництва.

За наведеними даними підприємства сформовано розподіл додаткових деревинних ресурсів за напрямками ймовірного та ефективного використання – перероблення на відповідну кондиційну продукцію (табл. 2, рис. 1).

Враховано технологічну придатність кожного типу відходів:

- Залишки тверді – обрізки (19.58 м³): 60% → євробрус/піддони/комплектуючі; 25% → подрібнення на тріску для ДСП; 10% → біопаливо; 5% → втрати.
- Тирса (6.65 м³): 70% → гранула/брикет; 20% → волокно для MDF; 5% → адсорбенти/компост; 5% → втрати.
- Стружка (4.24 м³): 50% → гранула/брикет; 30% → ДСП; 15% → підстилка/адсорбенти; 5% → втрати.

Такий розподіл відповідає типовій практиці: обрізки максимально залишають у механічному циклі (столярна плита/меблевий щит/євробрус/піддони), дрібні фракції – у біоенергетиці та панельних матеріалах, частина – у сорбентах/підстилці; невеликі технологічні втрати закладаються як неминучі.

Таблиця 2. Розподіл додаткових ресурсів за напрямками використання

Джерело відходів	Обсяг 2024, м³	Напрямок використання	Частка, %	Обсяг, м³
Залишки тверді – обрізки	19,58	Конструкційні елементи (СП, МЩ, ЄБ)	60	11,75
		Сировина на ДСП (після подрібнення)	25	4,90
		Біопаливо (брикети/гранули)	10	1,96
		Технологічні втрати/непридатні	5	0,98
Відходи м'які – тирса	6,65	Біопаливо (гранули/брикети)	70	4,66
		Сировина на MDF (волокно)	20	1,33
		Адсорбенти/наповнювачі/компост	5	0,33
		Технологічні втрати/непридатні	5	0,33
Відходи м'які – стружка	4,24	Біопаливо (гранули/брикети)	50	2,12
		Сировина на ДСП	30	1,27
		Підстилка/адсорбенти	15	0,64
		Технологічні втрати/непридатні	5	0,21

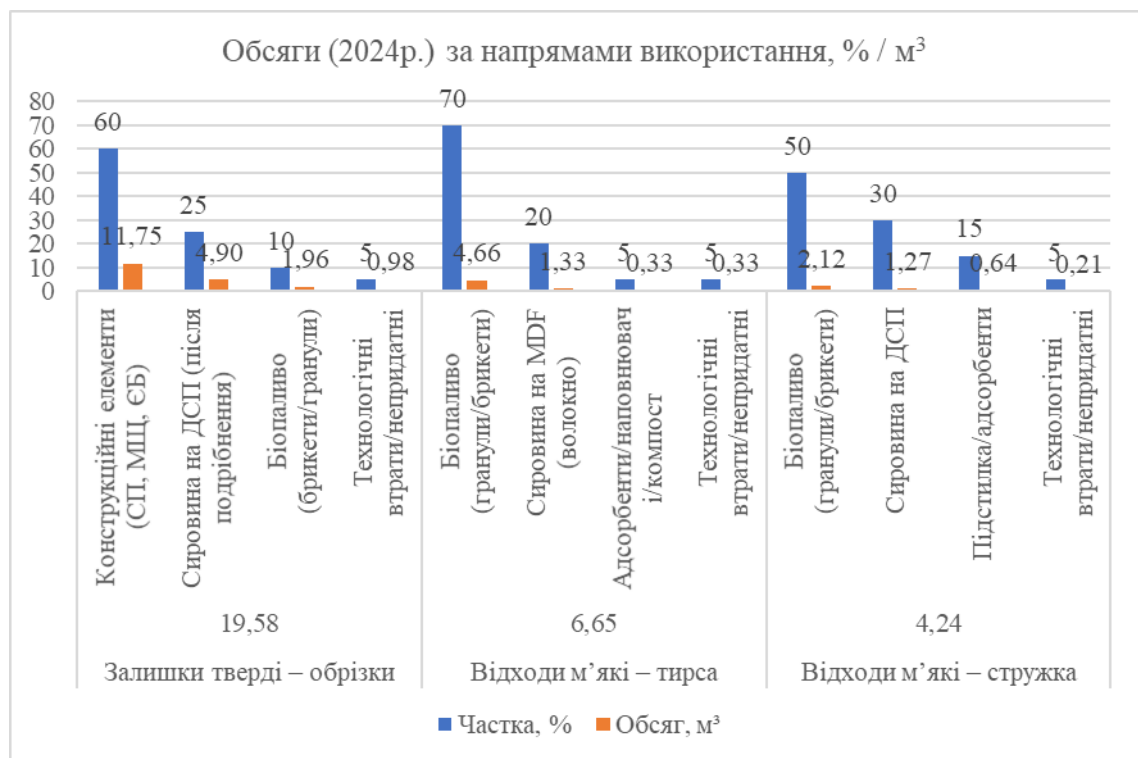


Рис. 1. Групи відходів за напрямками використання

Обсяги перероблення додаткових деревинних ресурсів за напрямками ймовірного та ефективного використання за відповідними технологічними процесами наведено на рис. 2. За основу взято 2024 р. як найактуальніший період і застосовано практичну модель розподілу



Рис. 2. Комплексний підхід до перероблення наявних відходів 2024 року

Підсумкові напрями використання (2024), м³: допоміжні конструкційні елементи (столярна плита (СП), меблевий щит (МЩ), євробрус (ЄБ), піддони, комплектуючі) – 11,75 м³; сировина на ДСП (після подрібнення обрізків + частина

стружки) – 4,9 м³; сировина на MDF (волокно з тирси) – 1,33 м³; біопаливо (гранула/брикет з тирси та стружки + частково обрізки) – 6,78 м³; підстилка/адсорбенти/компост – 0,64 м³; технологічні втрати/непридатні – 1,52 м³.

Розрахункові параметри для визначення економічних показників наведені у табл. 3, а сумарний розрахунковий економічний ефект від виробничої діяльності з перероблення деревинних залишків та відходів поданий у табл. 4. Оцінювання виконано за напрямками перероблення (столярна плита/меблевий щит/євробрус/піддони, стружка на ДСП, волокно на MDF, біопаливо, адсорбенти) з урахуванням собівартості операцій та уникнутих витрат на захоронення.

Табл. 3. Розрахункові дані для груп залишків та відходів

Напрямок використання	Обсяг, м ³	Щільність, кг/м ³	Маса, т
Адсорбенти/наповнювачі/компост	0,33	201,2	0,067
Біопаливо (брикети/гранули)	1,96	276,7	0,542
Біопаливо (гранули/брикети)	6,78	276,7	1,875
Конструкційні елементи (СП, МЩ, ЄБ)	11,75	650,0	7,637
Підстилка/адсорбенти	0,64	100,6	0,064
Сировина для ДСП	1,27	536,6	0,683
Стружка для ДСП (після подрібнення)	4,90	536,6	2,627
Сировина на MDF (волокно)	1,33	200,0	0,266
Технологічні втрати/непридатні	1,52	475,1	0,724
Підсумки перероблення	30,48		14,484
Диверсія від полігону (30,48-1,52)	28,95		

Табл. 4. Розрахунок сумарного економічного ефекту

Напрямок використання	Обсяг, м ³	Ціна за т, м ³	Дохід, грн	Ціна витрат	Витрати, грн	Маржа, грн
Адсорбенти/наповнювачі/компост	0,33	1500	0,100	300	0,020	0,080
Біопаливо (брикети/гранули)	1,96	8000	4,334	2500	1,354	2,980
Біопаливо (гранули/брикети)	6,78	8000	15,003	2500	4,688	10,314
Конструкційні елементи (СП, МЩ, ЄБ)	11,75	20000	234,980	2500	29,373	205,608
Підстилка/адсорбенти	0,64	1500	0,096	300	0,019	0,077
Сировина для ДСП	1,27	4000	2,731	1000	0,683	2,048
Стружка для ДСП (після подрібнення)	4,90	4000	10,507	1000	2,627	7,880
Сировина на MDF (волокно)	1,33	5000	1,331	1200	0,319	1,011
Технологічні втрати/непридатні	1,52	0	0,000		0,000	0,000
Підсумки перероблення	30,48		269,081		39,083	229,998
Диверсія від полігону (30,48-1,52)	28,95					
Уникнені витрати на полігон	28,95			800		23,163
Сумарний економічний ефект						253,161

Розрахунок еколого-економічних показників від виробничої діяльності з перероблення деревинних залишків та відходів поданий у табл. 5. Екологічна ефективність: диверсія від полігону – повторно використано ≈ 28.95 м³ із 30.48 м³ (≈ 95 %), втрати – ≈ 1.52 м³; енергетичний ефект від біопалива – з маси біомаси ≈ 2.42 т отримується ≈ 11.36 МВт·год енергії (оцінка: 4.7 МВт·год/т для сухих брикетів/гранул); відвернені викиди CO₂ при енергетичному заміщенні: заміщення

природного газу: $\approx 2,30$ т CO₂ (фактор 0.202 т/МВт·год); заміщення вугілля: $\approx 3,87$ т CO₂ (фактор 0.34 т/МВт·год).

Табл. 5. Розрахунок еколого-економічних показників

Еколого-енергетичні показники від біопалива	Енергія, МВт·год	Відвернені викиди, т CO ₂ (якщо заміщує газ)	Відвернені викиди, т CO ₂ (якщо заміщує вугілля)
Біопаливо, т	2,417	2,417	2,417
Перевідні значення	4,700	0,95	1,60
Отримані показники	11,36	2,30	3,87

Таким чином, запропонована схема (табл. 4) забезпечує суттєвий економічний ефект (понад 0,25 млн грн/рік) та значимі екологічні вигоди (табл. 5): майже повне відведення потоку від полігону та зменшення викидів CO₂. Подальше зростання ефекту очікується за рахунок збільшення частки механічного повторного використання обрізків і встановлення повноцінної лінії гранулювання. Сукупно результати демонструють, що впроваджена комбінована стратегія перероблення відходів є економічно доцільною, екологічно обґрунтованою і технологічно відтвореною для меблевого підприємства.

Обговорення результатів. Отримані дані демонструють стійке зниження загального обсягу залишків та відходів із 54,80 м³ (2022) до 30,48 м³ (2024) (-44%). Найбільший внесок у скорочення забезпечили тверді обрізки (-44% за 2022-2024), що синхронізується з переходом до точнішого розкрою та кращого використання карт розкрою. Невелике погіршення за фракцією тирси у 2023 р. (+6%) можна пояснити зміною номенклатури продукції (зростання шліфувальних операцій) або сезонними факторами, тоді як різке зниження у 2024 р. (-47%) свідчить про результативність оптимізації системи аспірації/розкрою. Для стружки спостерігаємо стабільне зменшення (-45% за 2 роки), що, ймовірно, пов'язане з повторним використанням в цеху і зміною режимів різання.

Запропонований матеріальний баланс 2024 р. забезпечив $\approx 95\%$ відведення від полігону (28,95 м³ із 30,48 м³) завдяки поєднанню механічного та енергетичного маршрутів. Ключовим є пріоритет механічного повторного використання твердих обрізків (столярна плита/меблевий щит/євробрус/піддони/комплектуючі) перед подрібненням на стружку: це зберігає «якість» матеріалу та капіталізує попередню обробку. Дрібнодисперсні фракції (тирса, стружка) оптимально відводяться на біопаливо та як сировина для плитних матеріалів (ДСП/MDF), що зменшує потребу у первинній деревині та стабілізує матеріальний цикл.

Сукупний економічний ефект за базовим сценарієм становить $\approx 0,25$ млн грн/рік, із яких $\approx 205,6$ тис. грн ($\approx 89\%$ маржі) припадає на лінійку євробрус/піддони. Другий за внеском напрям – біопаливо ($\approx 13,3$ тис. грн; $\approx 6\%$ маржі), третій – стружка на ДСП ($\approx 9,9$ тис. грн; $\approx 4\%$). Питомий ефект біопалива менший за механічний, але він критично важливий для утилізації дрібних фракцій і стабілізації балансу відходів. Додатково $\approx 23,2$ тис. грн/рік дає уникнення витрат на полігон. Отже, підприємство отримує подвійний вигаш: цінність продукту (євробрус/піддони) + уникнення витрат (полігон, закупівля первинної сировини).

Енергетичне використання дрібних фракцій забезпечує $\approx 11,35$ МВт·год корисної енергії й відвертає $\approx 2,29$ т CO₂ (за заміщення природного газу) або $\approx 3,86$ т CO₂ (за заміщення вугілля) щороку. Водночас для композитів (ДСП/MDF/фанера)

пріоритетним лишається матеріальне повторне використання через можливі екологічні обмеження при спалюванні (смоли, покриття). Таким чином, екологічно оптимально: обрізки – у механічний цикл; дрібні фракції – в біоенергію або у вторинні панельні матеріали залежно від локальної ціни енергії та вимог екологічного законодавства.

Виявлені ефекти відповідають тенденціям, описаним у працях із ресурсоефективності деревообробки: найвищу економічну віддачу дає каскадне використання деревини з максимальним збереженням її якості; дрібні фракції – основа для біоенергетики або щитових конструкційних матеріалів. Наголос літератури на сортуванні та підготовці відходів як драйвері якості вторинної продукції також підтверджується нашими даними: саме ці етапи «розмикають» вузькі місця для ДСП/MDF і знижують втрати.

Результати чутливі до: щільності та вологості фракцій ($\pm 10\text{--}20\%$ змінюють як масу, так і енергетичний потенціал); цін на євробрус/піддони та гранули; тарифів полігону; технологічної готовності (наявність дробарок, пресів, сушарок). Для композитів потрібний контроль вмісту смол і дотримання умов безпечного використання. Тому економічні показники варто перевіряти аналізом чутливості та, за можливості, доповнювати LCA-оцінкою.

Практичні рекомендації для управління:

- Закріпити пріоритет механічного повторного використання обрізків (євробрус/піддони) як «якір» маржі.
- Для дрібних фракцій – гнучкий маршрут: біопаливо $\leftrightarrow$ ДСП/MDF залежно від ринкових цін та сезонного попиту.
- Посилити сортування на джерелі (окремі контейнери, контроль вологості), що знижує «втрати» до $<5\%$.
- Розглянути контрагування збуту для вторинних потоків (гранули, стружка, волокно) для зниження ризику цінової волатильності.
- Впровадити KPI: відведення від полігону (%), маржа/м³ відходів, CO₂-уникнено (т/рік), частка механічного повторного використання обрізків (%).

Для подальших досліджень доцільно провести: детальну вологісну й фракційну характеристику для уточнення енергетичних коефіцієнтів; пілотну Sankey-візуалізацію для планування потужностей; порівняльну економіку «біопаливо» за різних сценаріїв цін і вуглецевих факторів; тестування адсорбентів/наповнювачів із дрібних фракцій у локальних процесах (очищення, підстилки, композити).

Узагальнюючи, поєднання каскадного використання деревини з технологічно гнучкими маршрутами для дрібних фракцій забезпечує водночас високу економічну ($\approx 0,25$ млн грн/рік) і екологічну (95% відведення від полігону; 2,3–3,9 т CO₂-екв/рік) віддачу та створює базу для сталого розвитку меблевого підприємства.

Висновки

1. Визначено, що за 2022-2024 рр. загальний обсяг залишків та відходів зменшився з 54,80 м³ до 30,48 м³ ($\approx -44\%$), що підтверджує результативність упроваджених змін у розкрої, сортуванні та повторному використанні матеріалів.

2. Встановлено, що найбільший внесок у скорочення забезпечили тверді обрізки (з 35,23 до 19,58 м³, $\approx -44\%$). Для тирси спостерігалось незначне зростання у 2023 р. ($\approx +6\%$) з подальшим різким зменшенням у 2024 р. ($\approx -47\%$), стружка зменшилася з 7,65 до 4,24 м³ ($\approx -45\%$).

3. Обґрунтовано, що запропонована матеріально-балансова модель із пріоритетом механічного повторного використання обрізків (євробрус/піддони) та енергетичної/панельної утилізації дрібних фракцій (біопаливо, ДСП/MDF) забезпечила $\approx 95\%$ відведення від полігону ($\approx 28,95 \text{ м}^3$ з $30,48 \text{ м}^3$).

4. Розраховано, що сумарний річний економічний ефект у базовому сценарії становить $\approx 0,25$ млн грн (маржа напрямів $\approx 0,23$ млн грн + уникнені витрати на полігон ≈ 23 тис. грн). Найвищу віддачу формує лінійка євробрус/піддони, яка є «якорем» маржі. Рекомендовано дрібні фракції (тирса, стружка) доцільно спрямовувати на біопаливо та як сировину для плитних матеріалів (ДСП/MDF). Це стабілізує баланс відходів і зменшує потребу у первинній деревині без істотного зниження загальної маржі.

5. Розраховано, що енергетичне використання дрібних фракцій забезпечує $\approx 11,35$ МВт·год/рік корисної енергії та відвертає $\approx 2,29$ т CO_2 при заміщенні природного газу або $\approx 3,86$ т CO_2 при заміщенні вугілля. Разом з високою часткою відведення від полігону це формує значущий екологічний ефект. Обґрунтовано, що дані підтверджують гіпотезу про те, що раціональне повторне використання деревинних і композитних відходів знижує виробничі витрати, підвищує екологічну безпеку та створює додаткову продукцію з високою доданою вартістю.

6. З'ясовано, що технологічні процеси повинні включати: сортування на джерелі, контроль вологості/фракцій, гнучке маршрутизування дрібних фракцій між біопаливом і конструкційними матеріалами залежно від ринкових цін, а також контракування збуту вторинних потоків. Визначено, що подальше підвищення ефективності можливе через збільшення частки механічного повторного використання обрізків, встановлення/модернізацію лінії гранулування, поглиблене LCA-оцінювання, а також розширення застосувань дрібних фракцій як наповнювачів/адсорбентів у власних технологічних процесах.

References

1. **Bajpai, P.** Management of Pulp and Paper Mill Waste. – Springer, 2015. – 425 p.
2. **FAO Forestry Paper 179.** Wood energy. – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2010.
3. **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).
4. **Gayda S.V.** (2007) Research of concentration of operations is in modern furniture Productions. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 33, 73-79, (in Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/42073314>
5. **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>
6. **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>
7. **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>
8. **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).
9. **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>
10. **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.
11. **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 June 23-26. 2013). TU Zvolen, 119-130.
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). 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).
14. **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.
15. **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.
16. **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.
17. **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.
18. **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.
19. **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>
20. **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).
21. **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.
22. **Gayda S.V.** (2017). The complex studies on the change of elastic properties of post-consumer fir wood with age. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 43:58-72 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42174308>
23. **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>
24. **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>.
25. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). *Bulletin of KhNTUA* 197:3-9, (in Ukrainian).
26. **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).
27. **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>
28. **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>
29. **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>
30. **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>.
31. **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>.
32. **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.
33. **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>
34. **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.

35. **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>
36. **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>
37. **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>
38. **Hill, C. A. S.** Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. – Wiley, 2006. – 260 p.
39. **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>
40. **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.
41. **Kozlowski, R., & Helwig, M.** Sustainable development of wood-based industries through utilization of residues // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 172. – P. 4184–4192.
42. **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.
43. **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.
44. **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>
45. **Malkapuram, R., Kumar, V., & Singh, N.** Recent development in natural fiber reinforced polypropylene composites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2009. V. 28(10). – P. 1169–1189.
46. **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>
47. **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>
48. **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>
49. **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>.
50. **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>.
51. **Pásztory, Z., & Gorbacheva, G.** Utilization of wood industry wastes in composite materials // *European Journal of Wood and Wood Products*. – 2021. – Vol. 79(6). – P. 1371–1382.
52. **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).
53. **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*,
54. **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>.
55. **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>.
56. **Gayda S.V.** (2011). Recovered wood is additional resource of raw material. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 37(1), 238-244. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/421137165>
57. **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>
58. **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>

59. 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>
60. 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>
61. 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.
62. Гайда С.В. Динаміка показників деревозаготівельної 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>
63. Гайда С.В. Основи створення гнучких виробничих систем. Гнучкі автоматизовані виробництва та робототехніка в деревообробці: Ч.1. – Львів: ЦНТЕІ, 1998. – 149 с.
64. 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>
65. 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.
66. 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.
67. Гайда С.В., Кшивецький Б.Я. Оперативно-виробниче планування гнучких виробничих систем // Метод. вказівки. – Львів : ЦНТЕІ, 2000. – 29 с.
68. Гайда С.В., Кшивецький Б.Я. Проектування гнучких виробничих систем: Метод. вказівки. – Львів : ЦНТЕІ, 1998. – 34 с.
69. 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>
70. 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>
71. 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.
72. 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>
73. Гайда С.В., Медвідь Л.В. Міцність звичайних столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез доповідей XIV МНПК (23–24 травня 2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 213-214.
74. 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>
75. 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>
76. 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-chnihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
77. 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>
78. 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.
79. Гайда С.В., Удовичський 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-chnihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
80. 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/10.36930/42255104>
81. Гайда, С.В. Перспективи роботизації меблевої промисловості України. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2003. – Вип. 11 – С. 36-37.

82. Гайда, С.В. Прогресивні плитні матеріали MDF та OSB. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 1 – С. 30-32.
83. Гайда, С.В. Що нам важко стілець зробити? Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 3 – С. 44-52.
84. Гайда, С.В. Обладнання для прогресивних технологій розкрою деревини. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2005. – Вип. 5 – С. 28-38.
85. Гайда С.В. Матеріали для виготовлення виробів з деревини: Навч. пос. – Л.: ВМС, 2000. - 160 с.
86. 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>
87. 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-chnihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
88. 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-chnihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
89. 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>
90. 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>
91. 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-chnihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>

UDC 674.001

*Director of LLC «Fortuna-mebli» V.V. Kyynanka;
prof. S.V. Gayda, Doktor of Sciences – UNFU*

Development of approaches for the utilization of wood residues and waste from the processing of wood and composite structural materials in furniture manufacturing at LLC «Fortuna-Mebli»

The paper addresses the generation and reuse of wood residues and composite waste in furniture manufacturing under the principles of a circular economy. The aim is to develop and substantiate effective recovery routes—mechanical reuse, panel production, and bioenergy—optimized against economic and environmental criteria. The methodology covers 2022-2024 flow accounting, waste classification (solid offcuts; fine fractions—sawdust, shavings), a plant-level mass-balance model with an allocation matrix, volume-to-mass conversions considering density and moisture, an economic model (revenues/costs/avoided landfill fees), energy and carbon assessment (LHV, emission factors), and sensitivity analysis. Results show a steady reduction of total waste from 54.80 m³ (2022) to 30.48 m³ (2024) (–44%), driven mainly by solid offcuts (35.23 to 19.58 m³). The proposed 2024 allocation achieves ≈95% landfill diversion (28.95 m³): prioritizing mechanical reuse of offcuts (glulam blocks/pallets/components) and directing fines to biofuel and secondary feedstock for PB/MDF. The baseline yearly economic effect reaches ≈UAH 0.25 million (including ≈UAH 0.23 million operating margin and ≈UAH 23k avoided landfill costs). The biofuel stream delivers ≈11.35 MWh/year and avoids ≈2.29 t CO₂ (if substituting natural gas) or ≈3.86 t CO₂ (coal). Scientific novelty lies in combining a cascade use strategy with an integrated, enterprise-level mass-balance model aligning technological, economic, and environmental indicators. Practical significance is a reproducible toolkit for waste management, capacity planning, and resource-efficiency KPIs deployment in furniture plants.

Keywords: furniture manufacturing; wood residues; composite waste; reuse; biofuel; particleboard; MDF; resource efficiency; landfill diversion; utilization, technology, used wood, circular economy, CO₂



*Пров. наук. співр. О.І. Голубчак¹, канд. с.-г. наук; наук співр. О.Р. Гнатюк²,
Ph.D – УкрНДІгірліс; доц. А.П. Іванюк³, канд. с.-г. наук – НЛТУ України*

ОСОБЛИВОСТІ ЛІСОКОРИСТУВАННЯ В ГІРСЬКИХ ЗАХИСНИХ ЛІСАХ ПРИКАРПАТТЯ

Встановлено, що площа гірських захисних лісів Державного лісового агентства України в Івано-Франківській обл. становить 130321,3 га, або 45 % від загальної площі таких лісів в Україні. За видовим складом у захисних лісах переважають ялинові деревостани – 85,1 %, на букові припадає 8,5%, на ялицеві – 2,8 %, решта на інші деревні види (сосна гірська, вільха сіра, береза повисла, явір та ін.) – 2,0%. Досліджено особливості ведення лісового господарства в гірських захисних лісах Івано-Франківської обл. на основі аналізу проведених лісгосподарських заходів за площами, видами робіт і обсягами заготовів деревини за період 2009-2020 рр. Впродовж досліджуваного періоду різними лісгосподарськими заходами в гірських захисних лісах Держлісагентства України в Івано-Франківській обл. охоплено 55947,1 га. У протиерозійних лісах площа проведених заходів знаходилася у межах 61,3-82,4% і за об'ємами заготовленої деревини – 70,2-83,8%. У лісах уздовж берегів річок, навколо озер, водойм. та ін. аналогічні значення становлять 16,6-34,3% та 15,4-27,5%. Встановлено, що у лісах різних підкатегорій захисних лісів переважають рубки оздоровлення та формування лісів, які були проведені на площі 59,33 %; інші заходи пов'язані з оздоровленням та формуванням лісів та заходи пов'язані із веденням лісового господарства – на 14,31 %; заходи, не пов'язані із веденням лісового господарства – на 9,51 %; інші лісгосподарські заходи – 16,57 %. Основну кількість деревини (90,74 %), яка заготовлюється при проведенні різних лісгосподарських заходів у захисних лісах, отримують при проведенні рубок оздоровлення та формування лісів. Загалом, проведення лісгосподарських заходів у лісах різних підкатегорій захисних лісів Держлісагентства України в Івано-Франківській обл. направлено на формування лісостанів, які характеризуються високою біологічною стійкістю та підвищеними захисними функціями.

Ключові слова: гірські захисні ліси, підкатегорії захисних лісів, категорії захисності, рубки, лісгосподарські заходи, Українські Карпати.

Вступ. Захисні ліси відіграють важливу роль у збереженні екологічної рівноваги, захисті ґрунтів від ерозії, регулюванні водного балансу, підтриманні біорізноманіття та пом'якшенні наслідків кліматичних змін, особливо в гірських регіонах [28, 29]. У світовій науковій літературі питання сталого лісокористування в гірських захисних лісах розглядаються в контексті адаптивного управління лісами, впливу рубок на екосистемні послуги, ролі лісів у зменшенні ризиків природних катастроф та підтриманні сталого розвитку регіонів [4, 5, 10, 11, 15, 17, 20, 25,

¹ Голубчак Олексій Іванович – академік Лісівничої академії наук України, кандидат сільськогосподарських наук, провідний науковий співробітник лабораторії лісознавства і лісівництва. Український науково-дослідний інститут гірського лісівництва імені П. С. Пастернака, вул. Михайла Грушевського, 31, Івано-Франківськ, 76015, Україна. Тел.: +38-098-573-06-00. E-mail: o.holubchak@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7817-1940> Scopus Author ID: 59338204700

² Гнатюк Олег Романович – доктор філософії, науковий співробітник лабораторії лісознавства і лісівництва. Український науково-дослідний інститут гірського лісівництва імені П. С. Пастернака, вул. Михайла Грушевського, 31, Івано-Франківськ, 76015, Україна. Тел.: +38-099-271-83-72. E-mail: o.r.natiuk@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2454-2237> ResearcherID: LXW-1076-2024 Scopus Author ID: 57226697620

³ Іванюк Андрій Петрович – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри лісових культур і лісової селекції. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: +38-050-971-67-31. E-mail: a.ivanuk@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1489-4733> ResearcherID: LSJ-4873-2024 Scopus Author ID: 59320127200

27]. Значну увагу науковці приділяють лісам Альп, Карпат та Балкан у контексті змін клімату та адаптації управлінських стратегій [3, 24, 33]. Водночас у межах українських Карпат, зокрема на території Івано-Франківської обл., досі недостатньо вивченими залишаються питання динаміки, структури та просторових характеристик лісогосподарських заходів, що здійснюються у захисних лісах різних підкатегорій.

Івано-Франківська обл. вирізняється особливо високим рівнем лісистості серед областей України. Лісовий фонд обл. займає приблизно 620,69 тис. га, що відповідає лісистості близько 45 %. Значна частина лісового фонду обл., а саме майже 54 %, віднесена до першої групи лісів, які виконують важливі захисні функції. До цієї групи належать охоронні смуги лісів, що захищають нерестилища цінних риб, протиерозійні ліси, захисні смуги вздовж залізниць та автомобільних доріг, ліси зелених зон, ліси першої та другої зон округів санітарної охорони курортів, а також ліси заповідників, національних природних парків та інших об'єктів природно-заповідного фонду державного і місцевого значення [9, 16, 19, 26].

Відсутність детального аналізу лісокористування в обраному регіоні ускладнює оцінку ефективності господарської діяльності та прийняття рішень у сфері сталого управління лісами. Це зумовлює актуальність дослідження, яке полягає у необхідності кількісного та якісного аналізу лісогосподарських заходів у гірських захисних лісах Прикарпаття з урахуванням їх екологічної ролі. Необхідність збереження екосистемних функцій гірських лісів Карпат в умовах інтенсивного використання ресурсів та змін клімату потребує вдосконалення підходів до планування та реалізації лісогосподарських заходів на основі актуальних даних.

Об'єкт дослідження – гірські захисні ліси Державного агентства лісових ресурсів України в Івано-Франківській обл.

Предмет дослідження – лісогосподарські заходи та їх обсяги, здійснені протягом 2009-2020 рр. у різних підкатегоріях захисних лісів.

Мета роботи – оцінити особливості ведення лісового господарства в гірських захисних лісах Івано-Франківської обл. на основі аналізу проведених лісогосподарських заходів за площами, видами робіт і обсягами заготівлі деревини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Попри позитивні зрушення, аналіз сучасної наукової літератури свідчить про те, що питання лісокористування в умовах гірських захисних лісів залишається дослідженим лише частково і має фрагментарний характер [5-8, 10, 12]. Автори вважають, що лісові екосистеми гірської зони є критично вразливими до кліматичних та антропогенних чинників, а їхня стабільність визначає не лише екологічну, а й соціальну безпеку прилеглих територій [3, 13, 22]. Науковці багатьох країн світу приділяють значну увагу збереженню та відтворенню генетичних ресурсів як автохтонних, так і інтродукованих видів, які мають цінну деревину, володіють корисними лісівничими властивостями, виконують ґрунтозахисну функцію та підвищують стійкість лісових насаджень до несприятливих умов довкілля [30, 31, 34]. У дослідженнях Кияка та ін. (2022) зосереджено увагу на наслідках кліматичних змін для структури та функціонування гірських фітоценозів: скорочення снігового покриву, зсув фенологічних фаз, активізація хвороб і шкідників [18]. Такі процеси вже спостерігаються в межах Івано-Франківщини, особливо у ялинових лісах, які демонструють зниження стійкості до зовнішніх стресів [12, 20].

В низці публікацій наголошують на важливості включення лісового господарства до регіональних стратегій просторового розвитку [1, 14]. Зокрема, йдеться про потребу в оновленні управлінських моделей, що дозволять узгодити екологічну доцільність із економічною ефективністю у межах територіальних громад.

Особливу увагу дослідники приділяють захисним лісам як елементу екосистемної безпеки гір. У працях науковців УкрНДІгірліс обґрунтовано типологічну, функціональну класифікацію захисних лісів Карпат, що дозволяє планувати господарські заходи з урахуванням екологічної вразливості та функціональної ролі насаджень (протиерозійної, водоохоронної, санітарної тощо) [5-8, 10].

Водночас, автори підкреслюють недостатню деталізацію щодо практичної реалізації заходів лісоуправління – зокрема недостатньо дослідженим залишається питання просторового розподілу лісокористування у межах різних підкатегорій захисних лісів, ефективності виконання заходів, їх масштабів та відповідності функціональному призначенню лісів [2, 3]. На їх думку, бракує порівняльного аналізу між типами заходів (наприклад, між санітарними рубками та лісовідновленням), а також вивчення динаміки змін за тривалий період.

Таким чином, актуальні публікації засвідчують високий рівень теоретичного опрацювання теми, однак вказують на наукову прогалину у емпіричному аналізі обсягів, інтенсивності та просторової структури лісогосподарських втручань, в тому числі, в гірських захисних лісах. Це створює підґрунтя для подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію лісокористування з урахуванням природоохоронних функцій лісів, місцевих ландшафтів і соціально-економічних викликів гірських територій.

Матеріали та методи дослідження. Аналіз лісокористування у гірських захисних лісах Прикарпаття здійснено за відомчими матеріалами Держлісагенства України та інформаційними даними ВО «Укрдержліспроект». Аналізу підлягали ділянки (площі) чотирьох підкатегорій захисних лісів: ліси протиерозійні; ліси уздовж берегів річок, навколо озер, водойм та ін.; ліси уздовж смуг відведення автомобільних доріг; ліси уздовж смуг відведення залізниць, на яких протягом 2009-2020 років були проведені лісогосподарські заходи [21].

З врахуванням правил рубок головного користування в гірських лісах Карпат, санітарних правил у лісах України та інших нормативних документів, що регулюють поліпшення якісного складу лісів, проведення інших рубок та робіт, пов'язаних і не пов'язаних із веденням лісового господарства, здійснені лісогосподарські заходи, об'єднані у наступні групи:

1. Рубки головного користування: останній прийом поступової рубки, суцільна, добровільно-вибіркова, поступова рубка перший прийом (код 1);

2. Рубки формування і оздоровлення лісів: вибіркова санітарна рубка, суцільна санітарна рубка, лісовідновна рубка вибіркова, лісовідновна рубка смугова, лісовідновна рубка суцільна, освітлення, очищення, проріджування, прохідна, рубка переформування, рубка реконструктивна (код 2);

3. Інші заходи пов'язані з оздоровлення та формування лісів та заходи пов'язані із веденням лісового господарства: ліквідація захаращеності, розрубвання трас для будівництва доріг, розчищення кварталних просік, рубка рідколісся, розрубвання кварталних просік (код 3);

4. Заходи, не пов'язані із веденням лісового господарства: розрубання волоків, розрубання трас ліній електромереж, розчищення земель спеціального господарського призначення, розчищення окружної межі, рубка для спорудження об'єктів спеціального господарського призначення, рубка насаджень для забезпечення функціонування об'єктів спецпризначення (код 4);

5. Інші лісогосподарські заходи: переведення лісових культур у вкриті лісовою рослинністю землі, природне відновлення лісу, створення лісових культур, створення лісових культур лісовідновлювальних, заготівля новорічних ялинок, зміна категорій земель (код 5).

Результати дослідження та їх обговорення.

Гірські захисні ліси Держлісагенства України в Івано-Франківській обл. займають 130321,3 га (45% від загальної площі таких лісів). Захисні ліси представлені, в основному, насадженнями ялини європейської (85,1%) та бука лісового (8,5%), на ялицю білу припадає 2,8 %, на сосну гірську – 1,6%, а на інші деревні види (вільха сіра, береза повисла, дуб звичайний, явір та ін.) – 2,0% (рис. 1).

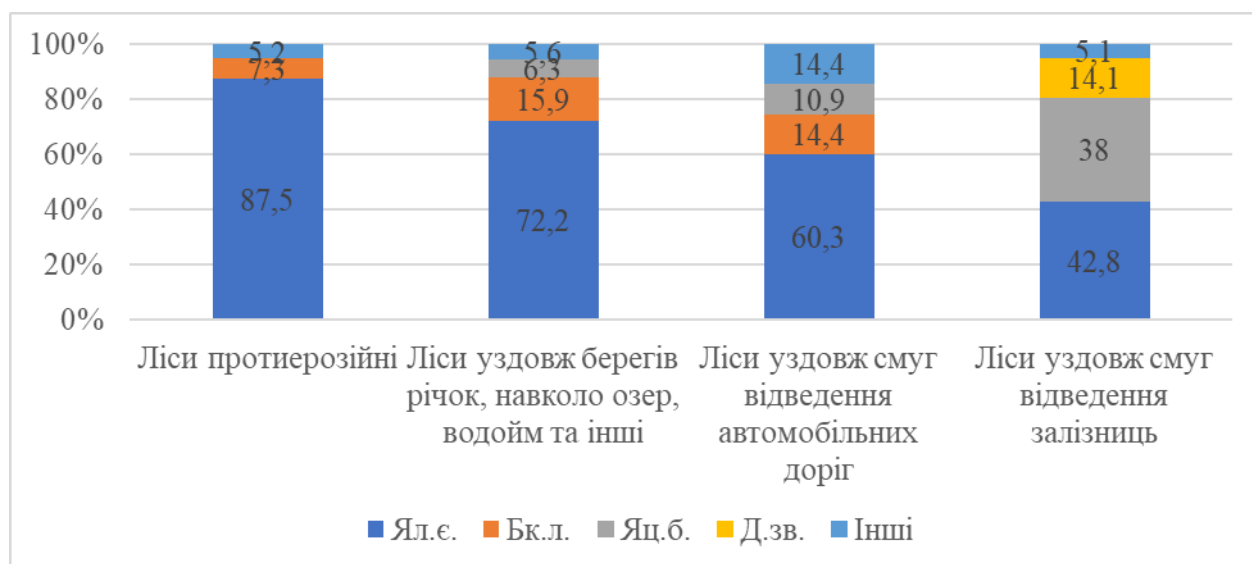


Рис. 1. Розподіл площі гірських захисних лісів Держлісагенства України в Івано-Франківській обл. за панівними видами

Протягом 2009-2020 років різними лісогосподарськими заходами в гірських захисних лісах Держлісагенства України в Івано-Франківській обл. охоплено 55947,1 га (табл. 1). Лісогосподарські заходи переважно проводилися в таких підкатегоріях захисних лісів, як ліси протиерозійні і ліси уздовж берегів річок, навколо озер, водойм та інші, що складає 95,35 % від загальної площі та 97,86 % від загального запасу вирубанної деревини. Необхідно зазначити, що площа захисних лісів охоплених лісогосподарськими заходами тісно корелює з загальною площею лісів різних підкатегорій захисних лісів [21]. Очевидно, що в даному регіоні суттєво переважають за поширенням ліси протиерозійні і ліси уздовж берегів річок, навколо озер, водойм та інші і відносно незначні площі займають ліси уздовж смуг відведення автомобільних доріг і залізниць.

За період 2009-2020 рр. як за площею проведення, так і за об'ємами заготовленої деревини переважають лісогосподарські заходи, здійснені у протиерозійних лісах, їх частка від усіх здійснених лісогосподарських заходів коливається в межах 61,3-82,4% за площею та 70,2-83,8% за запасом) та у лісах уздовж берегів рі-

чок, навколо озер, водойм та ін. (16,6-34,3% за площею, 15,4-27,5% за запасом відповідно) (рис. 2).

Таблиця 1. Розподіл лісів задіяних лісогосподарськими заходами протягом 2009-2020 років підприємствами Держлісагенства України в Івано-Франківській обл. за підкатегоріями захисних лісів

Підкатегорія захисних лісів	Площа		Запас загальний	
	га	%	м ³	%
Ліси протиерозійні	40069,4	71,62	2189516	77,84
Ліси уздовж берегів річок, навколо озер, водойм та інші	13221,5	23,63	563184	20,02
Ліси уздовж смуг відведення автомобільних доріг	1871,3	3,34	44030	1,57
Ліси уздовж смуг відведення залізниць	784,9	1,40	16080	0,57
Разом	55947,1	100,00	2812810	100,00



Рис. 2. Динаміка здійснення лісогосподарських заходів у гірських захисних лісах Держлісагенства України в Івано-Франківській обл.

В лісах різних підкатегорій захисних лісів застосовували низку різноманітних лісогосподарських заходів. Переважно вони пов'язані з втручанням у лісостани шляхом проведення різних видів та способів рубок. Проводилися також заходи без прямого впливу на деревостани (переведення лісових культур у вкриті лісо-вою рослинністю землі, створення лісових культур тощо) (табл. 2).

Таблиця 2. Розподіл захисних лісів за групами лісогосподарських заходів

Підкатегорія захисних лісів	Код заходу (рубки й заходи)					Всього, га /%	
	1	2	3	4	5		
Ліси протиерозійні	29,8	23576,3	5504,7	3928,7	7029,9	40069,4	71,6
Ліси уздовж берегів річок, навколо озер, водойм та інші	86,2	8174,6	1701,7	1121,5	2137,5	13221,5	23,6
Ліси уздовж смуг відведення автомобільних доріг	11,6	914,3	576,4	115,1	253,9	1871,3	3,3
Ліси уздовж смуг відведення залізниць	34,1	525,4	125,4		100	784,9	1,4
Разом, га/%	161,7	33190,6	7908,2	5165,3	9521,3	55947,1	100,0
	0,3	59,3	14,1	9,2	17,0	100	

Рубки головного користування в лісах різних підкатегорій захисних лісів проводились у виняткових випадках. Площа таких лісосік за 12-річний період становить всього 161,7 га або 0,3 % від загальної площі задіяних лісогосподарською діяльністю усіх підкатегорій захисних лісів (рис. 3).

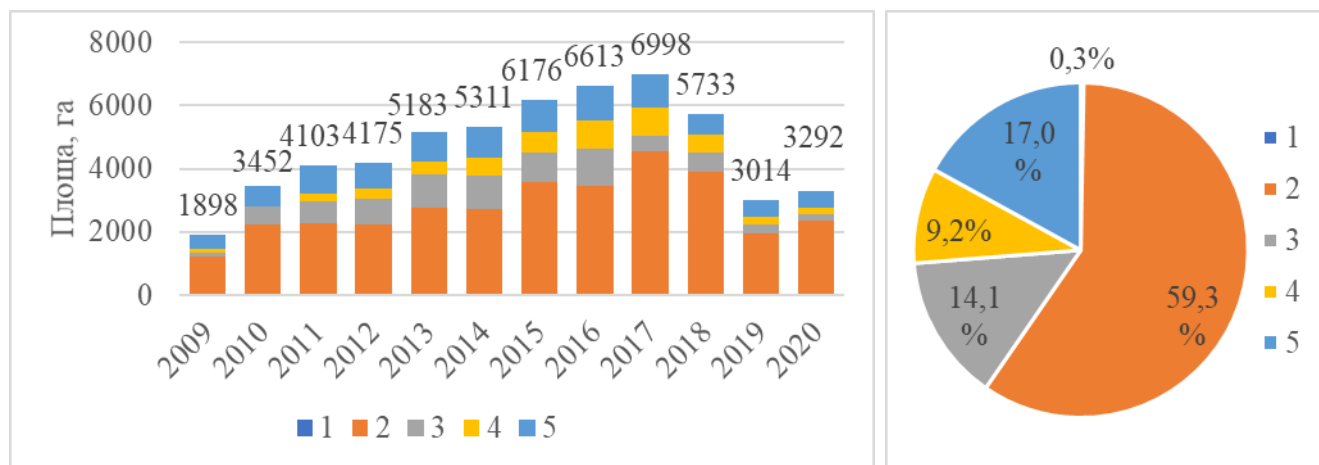


Рис. 3. Розподіл площі лісогосподарських заходів за роками (зліва) та протягом 2009-2020 років (справа)

Отже, протягом 12 років в гірських захисних лісах Держлісагентства України в Івано-Франківській обл. лісогосподарськими заходами було охоплено близько 55,9 тис. га, з яких 26,7 тис. га припадає на рубки формування і оздоровлення лісів. Значні площі охоплені заходами не пов'язаними з веденням лісового господарства (розрубання волоків, розрубання трас ліній електромереж, розчищення земель спеціального господарського призначення та ін.), заходами пов'язаними з рубками формування та оздоровлення лісів (догляд за підростом, рубки рідколісся, доповнення лісових культур, рубки небезпечних та поодинок дерев та ін.) та іншими лісогосподарськими заходами (заготівля новорічних ялинок, переведення лісових культур у вкриті лісовою рослинністю землі, створення лісових культур, переведення лісових культур у вкриті лісовою рослинністю землі, переведення природно поновлених земель у вкриті лісовою рослинністю землі, природне відновлення лісу та ін.). Під час проведення лісогосподарських заходів в лісах різних підкатегорій захисних лісів загалом заготовлено 2812810 м³ деревини (табл. 3).

Таблиця 3. Розподіл обсягу заготовленої деревини за категоріями лісогосподарських заходів

Підкатегорія захисних лісів	Код заходу (рубки й заходи)					Всього, м ³ /%	
	1	2	3	4	5		
Ліси протиерозійні	9101	2042999	110132	27284	0	2189516	77,8
Ліси уздовж берегів річок, навколо озер, водойм та інші	32987	471346	45859	12992	0	563184	20,0
Ліси уздовж смуг відведення автомобільних доріг	3936	30540	6457	3097	0	44030	1,6
Ліси уздовж смуг відведення залізниць	7934	7439	707	0	0	16080	0,6
Разом, га/%	53958	2552324	163155	43373	0	2812810	100,0
	1,9	90,7	5,8	1,5	0	100,0	

З табл. 3 видно, що в процесі проведення рубок головного користування заготовлено 53958 м³ деревини, що становить 1,92 % від загального її обсягу. Переважний обсяг деревини (90,74 %) було заготовлено при проведенні рубок оздоровлення та формування лісів, істотно менше – (5,84 %) при проведенні інших заходів пов'язаних з оздоровленням та формуванням лісів та заходів пов'язаних із веденням лісового господарства і ще менше – (1,50 %) при проведенні заходів, не пов'язаних із веденням лісового господарства.

Однак розподіл заготовленої деревини при проведенні різних лісогосподарських заходів у окремі роки виявився нерівномірним (рис. 4).

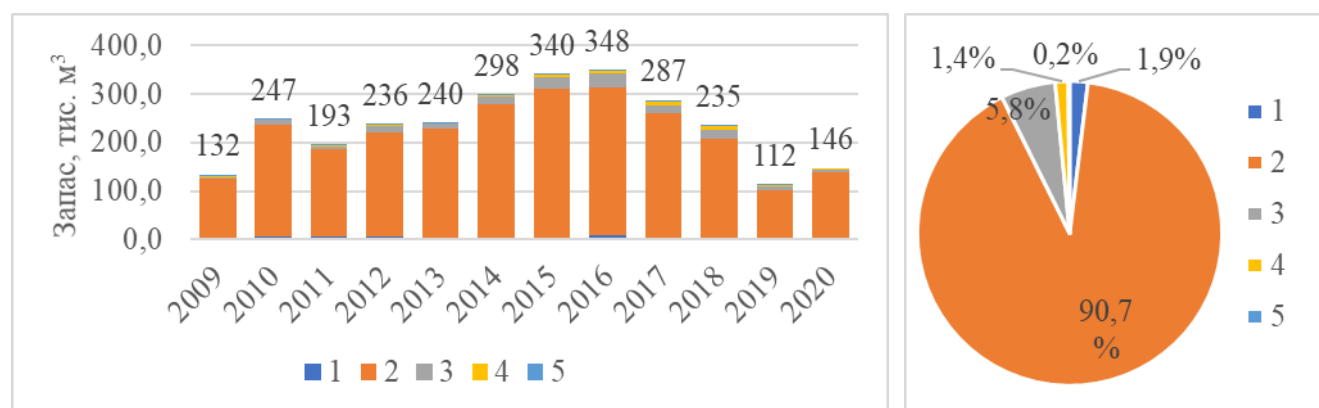


Рис. 4. Динаміка заготівлі деревини в захисних лісах Держлісагентства України в Івано-Франківській обл. протягом 2009-2020 років

Варто зазначити, що після 2016 року зменшилась частка рубок за способом та технологією схожих до суцільних (суцільна санітарна рубка, останній прийом поступової рубки, лісовідновна рубка та ін.), а частка рубок за способом та технологією схожих до вибіркового (санітарна рубка вибіркова, лісовідновна рубка вибіркова, добровільно-вибіркова рубка, рубка переформування тощо) збільшилась.

При цьому також змінились середньорічні значення обсягів заготівлі деревини: від рубок за способом та технологією схожих до суцільних кількість заготовленої деревини зменшилась на 26,6% та зросла у понад 2 рази від рубок за способом та технологією схожих до вибіркового (рис. 5).

Упродовж останніх років спостерігається зростання наукового інтересу до проблем сталого використання лісових ресурсів у Карпатському регіоні. Це зумовлено як екологічною вразливістю гірських екосистем, так і високою соціальною значущістю лісів для місцевих громад [15, 17, 20, 34]. У контексті адміністративно-територіальної реформи, що відбувається в Україні, зростає роль об'єднаних територіальних громад, особливо у гірських районах, що актуалізує потребу у впровадженні нових підходів до управління природними ресурсами.

У наукових дослідженнях наголошується на необхідності формування інтегрованої моделі лісоуправління, яка б поєднувала інтереси громад, бізнесу та державних інституцій, забезпечуючи при цьому збалансоване використання лісових ресурсів відповідно до принципів сталого розвитку [1, 32].

Паралельно в Україні триває масштабна реформа лісової галузі, яка передбачає цифровізацію управлінських процесів, підвищення прозорості обігу деревини, модернізацію лісогосподарської інфраструктури та впровадження європейських стандартів [23]. Зокрема, створено єдине державне підприємство «Ліси України», що об'єднало колишні державні лісогосподарські підприємства, а також впрова-

джено електронну систему обліку деревини, яка забезпечує її простежуваність на всіх етапах – від заготівлі до реалізації.

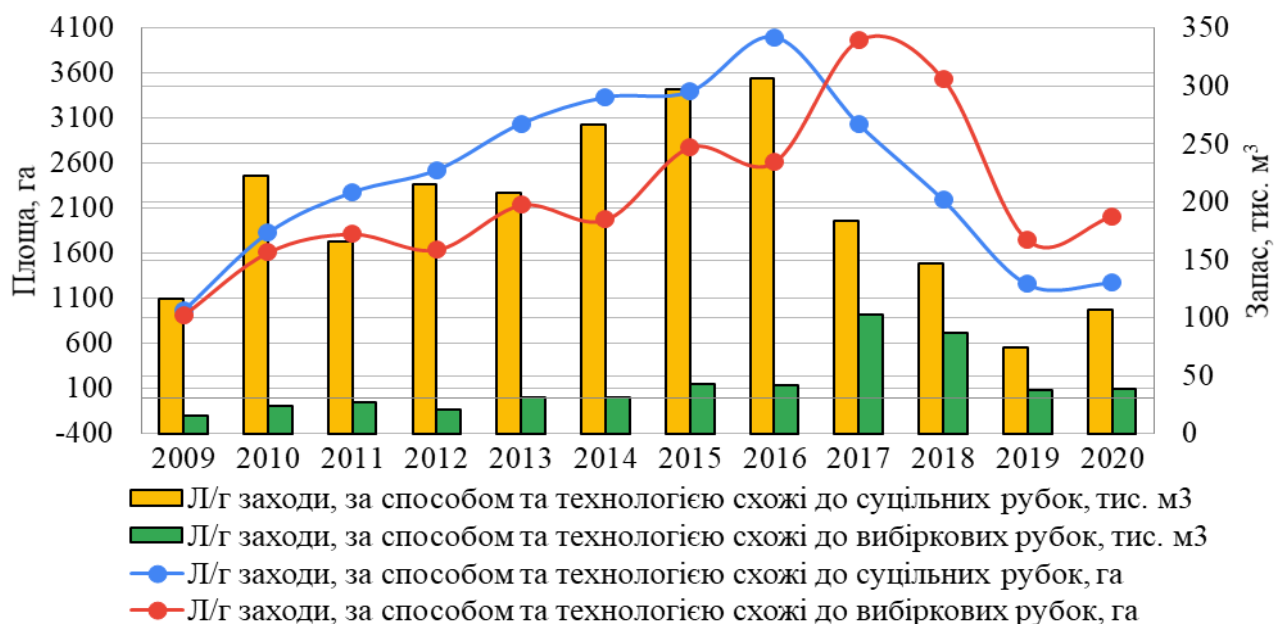


Рис. 5. Динаміка зміни площі та заготівлі деревини від основних видів рубок протягом 2009-2020 рр.

Висновки.

1. Площа гірських захисних лісів Держлісагентства України в Івано-Франківській обл. становить 130321,3 га, що складає 45 % від загальної площі таких лісів в Україні. За видовим складом у захисних лісах переважають ялинові деревостани – 85,1 %, на букові припадає 8,5%, на ялицеві – 2,8 %, решта на інші деревні види (сосна гірська, вільха сіра, береза повисла, явір та ін.) – 2,0%.

2. Впродовж досліджуваного періоду різними лісогосподарськими заходами в гірських захисних лісах Держлісагентства України в Івано-Франківській обл. охоплено 55947,1 га. У протиерозійних лісах площа проведених заходів знаходилася у межах 61,3-82,4% і за об'ємами заготовленої деревини – 70,2-83,8%. У лісах уздовж берегів річок, навколо озер, водойм та ін. аналогічні значення становлять 16,6-34,3% та 15,4-27,5%.

3. У лісах різних підкатегорій захисних лісів переважають рубки оздоровлення та формування лісів, які були проведені на площі 59,33 %; інші заходи пов'язані з оздоровленням та формуванням лісів та заходи пов'язані із веденням лісового господарства – на 14,31 %; заходи, не пов'язані із веденням лісового господарства – на 9,51 %; інші лісогосподарські заходи – 16,57 %.

4. Основна кількість деревини (90,74 %), яка заготовлюється при проведенні різних лісогосподарських заходів у захисних лісах відбувається при проведенні рубок оздоровлення та формування лісів.

5. Проведення лісогосподарських заходів у лісах різних підкатегорій захисних лісів Держлісагентства України в Івано-Франківській обл. направлено на формування лісостанів, які характеризуються високою біологічною стійкістю та підвищеними захисними функціями.

References

1. Блистів, В.І., Малець, О.О., Малець, Н.Б., Бабинець, М.М. (2024). Правове внормування ведення лісового господарства для гірської екосистеми карпатських лісів. <http://dspace.msu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/11501>
2. Бондар, О.Б. (2025). Аналіз функціональних категорій лісів заходу України. Агроекологічний журнал, (1), 56-76. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2025.327091>
3. Волковська, Ю., Дубовіч, І. (2024). Стале ведення лісового господарства в умовах зміни клімату: досвід країн-членів ЄС. Сталий розвиток економіки, (4(51)), 403-408. <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2024-51-56>
4. Гаврусевич А.М., Іванюк А.П., Калущкий І.Ф. Підвищення вітростійкості деревостанів у високогірному пасмі смерекових лісів Українських Карпат. Науковий вісник НЛТУ України. – Львів : НЛТУ України, 2007. – Вип. 17.7. – С. 52-55.
5. Голубчак О., Гнатюк О., Гудима В., Іванюк А. Особливо захисні ділянки в лісах Українських Карпат // Матеріали МНТК «Збереження, відтворення та раціональне використання природних ресурсів об'єктів ПЗФ» (Кринос-Галич, 9 серпня 2024 р). – Галич, 2024. – С. 37–39.
6. Голубчак О.І., Гнатюк О.Р., Іванюк А.П., Гудима В.Д. Типологічна структура захисних лісів Українських Карпат. Матеріали МНТК «Лісотехнічна освіта і наука: виклики сьогодення та перспективи розвитку». 23-25 жовтня 2024 року. м. Львів. <https://doi.org/10.36930/conf150.1.25>
7. Голубчак О., Гнатюк О., Іванюк А., Гудима В. Функціональна структура захисних лісів Українських Карпат. Природоохоронні території України: сучасні виклики та перспективи розвитку : Матеріали МНТК «40-річчя створення Природного заповідника «Розточчя» (сmt Івано-Франкове, 2024 р.). 2024. – С. 43–46. <https://doi.org/10.32718/zaproz-conference.2024.08>
8. Гудима, В.Д., Парпан, Т.В., Пліхтяк, П.П. (2018). Функціонально-цільова та вікова структура гірських лісів Українських Карпат. Лісівництво і агролісомеліорація, (133), 71-77. <https://doi.org/10.33220/1026-3365.133.2018.71>
9. Дебринюк Ю.М., Кузьович В.С., Іванюк А.П. Платанційні лісові насадження як відношуване джерело енергії // Науковий вісник НЛТУ України. – 2011. – Вип. 21 (18). – С. 9–12.
10. Дослідити стан і структуру гірських захисних лісів і розробити заходи з їх раціонального використання (2024). Звіт з з науково-дослідної роботи (заключний). УкрНДДіГіріліс, 250 с.
11. Іванюк А.П. Природа вітровалів та їх вплив на продуктивність лісу в гірських і передгірських умовах Українських Карпат. Автореферат дисерт. канд. с.-г. наук. – Львів: Вид-во УкрДЛТУ, 1996. – 20 с.
12. Іванюк, А.П., Голубчак, О.І., Гнатюк, О.Р. (2024). Вплив господарських заходів на стан ялинових захисних лісів Українських Карпат. Науковий вісник НЛТУ України, 34(6), 41–48. <https://doi.org/10.36930/40340606>
13. Іванюк, А.П., Лісовий, М.М., Данчук, О.Т. (2025). Біологічна стійкість та основні показники росту *Fagus sylvatica* L. в умовах географічних культур Українського Розточчя. Науковий вісник НЛТУ України, 35(4), 9-17. <https://doi.org/10.36930/40350401>
14. Кагало, О., Проценко, Л., Бондарук, Г., Скрильніков, Д. (2015). Розробка ключових законодавчих актів щодо охорони біорізноманіття в лісах: адаптація українського законодавства до вимог ЄС. URL: https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/development_of_legislation_for_biodiversity_protection_ua_.pdf (дата звернення: 27.06. 2025).
15. Калінін, М.І., Калущкий, І.Ф., Іванюк, А.П. (1997). Вітровали в гірських та передгірських регіонах Українських Карпат. Львів: Вид-во» Манускрипт.
16. Калущкий, І.Ф., Гаврусевич, А.М., Іванюк, А.П., Запоточний, М.М. (2009). Рекреаційні гірські ліси на івано-франківщині та особливості ведення господарства в них. Науковий вісник НЛТУ України, 19 (5), 49-54.
17. Криницький, Г. Т. (2006). Чинники формування вітровалів та підвищення біологічної стійкості насаджень у зоні впливу рекреаційного комплексу «Буковель». Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть. – 2006. – Вип. 32. – С. 20-27.
18. Кияк В., Данилик І., Шпаківська І., Кагало О., Лобачевська О., Канарський Ю., Марискевич О., Андрєєва О., Кобів Ю., Микітчак Т., Кияк Н., Рабик І. Збереження біоріз-

номаніття у гірських і рівнинних регіонах України в умовах кліматичних змін. – Львів: Простір-М, 2022. –189 с.

19. **Ліси Івано-Франківщини**, (2023). Прес-служба Західного міжрегіонального управління лісового та мисливського господарства. Retrieved from: <https://w.forest.gov.ua/forests?id=5280>

20. **Олійник, В. С., Павук, М. М.** (2024). Шкідливі екзогенні процеси в лісах Українських Карпат. Науковий вісник НЛТУ України, 34(5), 35-40. <https://doi.org/10.36930/40340505>

21. **Про затвердження Порядку поділу лісів на категорії та виділення особливо захисних лісових ділянок**: Постанова Кабінету Міністрів України від 16.06.2007 р. № 733. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/733-2007-%D0%BF#Text>

22. **Сибірна Р.І., Сибірний А.В.** Пошкодження лісових масивів як фактор негативного впливу на життєдіяльність людини // Екологічні та гігієнічні проблеми сфери життєдіяльності людини. Матеріали МНТК. – 2023. – С. 175-176.

23. **Хорошко, О.** (2022). Проблеми та перспективи впровадження інноваційної моделі адміністрування підприємств лісової галузі України. Mechanism of an Economic Regulation, (3-4(97-98), 46-50. <https://doi.org/10.32782/mer.2022.97-98.11>

24. **Bouriaud, L., Marzano, M., Lexer, M., Nichiforel, L., Reyer, C., Temperli, C., Hanewinkel, M.** (2015). Institutional factors and opportunities for adapting European forest management to climate change. Regional environmental change, 15, 1595-1609. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0852-8>

25. **Brang, P., Spathelf, P., Larsen, J. B., Bauhus, J., Bončina, A., Chauvin, C., Svoboda, M.** (2014). Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change. Forestry, 87(4), 492–503. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu018>

26. **Chaskovskyy, O. H., Karabchuk, D. Y., Ivaniuk, A. P.** (2019). Forest disturbance in the Ukrainian Carpathians from 1984 to 2016. Scientific Bulletin of UNFU, 29(2), 9-14.

27. **Cooper, L., MacFarlane, D.** (2023). Climate-Smart Forestry: Promise and risks for forests, society, and climate. PLOS Climate, 2(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000305>

28. **Hnatiuk, O., Ivaniuk, A., Mohytych, V., Vovk, A.** (2024, October). Identification of Soil Erosion Risk Areas in the Carpathian Forests Using GIS Methods. In International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024» (Vol. 2024, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510039>

29. **Huminilovych, R., Stadnik, V., Sozanskyi, M., Pidlisnyuk, V., Ivaniuk, A.** (2023, October). Monitoring of soils contaminated by military activities during phytoremediation using *Miscanthus x giganteus*. In International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2023». (Vol. 2023, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510039>

30. **Huz, M.M., Ivaniuk, A.P., Korol, M.M., Fennuch, T.V.** (2019). Особливості росту кедра атласького (*Cedrus Atlantica* (Endl.) Manetti ex Carrière) у лісових культурах Закарпаття. Науковий вісник НЛТУ України. <https://doi.org/10.15421/40290502>

31. **Ivaniuk, A. P., Blystiv, V.I., Yurkiv, Z.M., Sishchuk, M.M., Hnatiuk, O.R.** (2024). Генетико-селекційні ресурси *Larix decidua* Mill. в Україні. Forestry Education and Science: Current Challenges and Development Prospects. International Science-Practical Conference, October 23-25, 2024, Lviv, Ukraine. <https://doi.org/10.36930/conf150.1.32>

32. **Kozlovskiy, M.P., Shkaruba, A.D., Shpakivska, I.M., Rozhak, V.P.** (2018). Ecological framework of forest management in the context of european integration of Ukraine. Scientific Bulletin of UNFU, 28(11), 48-54. <https://doi.org/10.15421/40281109>

33. **Price, M., Gratzer, G., Alemayehu Duguma, L., Kohler, T., & Maselli, D.** (2011). Mountain Forests in a Changing World: realizing values, addressing challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and Centre of Development and Environment (CDE). https://boris.unibe.ch/6755/1/FAO_Mountain-Forests-in-a-Changing-World.pdf

34. **Zhang, Z., Zhang, L., Xu, H., Creed, I. F., Blanco, J. A., Wei, X., ... & Bishop, K.** (2023). Forest water-use efficiency: Effects of climate change and management on the coupling of carbon and water processes. Forest Ecology and Management, 534, 120853. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120853>

Features of forest use in mountain protective forests of the Carpathian Region

It has been established that the area of mountain protective forests of the State Forestry Agency of Ukraine in the Ivano-Frankivsk region is 130,321.3 hectares, or 45% of the total area of such forests in Ukraine. In terms of species composition, spruce stands predominate in protective forests – 85.1%, beech accounts for 8.5%, fir – 2.8%, and the rest for other tree species (mountain pine, gray alder, weeping birch, maple, etc.) – 2.0%. The peculiarities of forest management in the mountain protective forests of the Ivano-Frankivsk region were studied based on an analysis of forestry measures carried out by area, type of work, and volume of timber harvesting for the period 2009-2020. During the study period, various forestry measures were carried out in the mountain protection forests of the State Forestry Agency of Ukraine in the Ivano-Frankivsk region, covering 55,947.1 hectares. In erosion control forests, the area covered by the measures ranged from 61.3 to 82.4%, and the volume of timber harvested ranged from 70.2 to 83.8%. In forests along river banks, around lakes, reservoirs, etc., the corresponding figures are 16.6-34.3% and 15.4-27.5%. It has been established that in forests of various subcategories of protective forests, regeneration and forest formation felling prevails, which was carried out on an area of 59.33%; other measures related to forest restoration and formation and measures related to forest management accounted for 14.31%; measures not related to forest management accounted for 9.51%; other forestry measures accounted for 16.57%. The majority of timber (90.74%) harvested during various forestry activities in protective forests is obtained through forest restoration and formation logging. In general, forestry activities in forests of various subcategories of protective forests of the State Forestry Agency of Ukraine in the Ivano-Frankivsk region are aimed at forming forest stands characterized by high biological stability and increased protective functions.

Keywords: mountain protective forests, subcategories of protective forests, categories of protection, logging, forestry activities, Ukrainian Carpathians.



Аспірант А.О. Луценко¹ – НЛТУ України

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АДАПТИВНОГО ПРОЕКТУВАННЯ МЕБЛІВ У СЕРЕДОВИЩІ IMOS

Розглянуто можливості підвищення адаптивності CAD-системи IMOS у процесі проектування меблевих виробів за рахунок інтеграції інструментів дизайн-мислення. Проаналізовано сучасні підходи до параметричного моделювання в середовищах IMOS, TopSolid'Wood, WoodCAD/CAM, виявлено обмеження, пов'язані з жорсткістю бібліотек і складністю зміни логіки побудови моделей. Запропоновано методику впровадження принципів *Empathize–Define–Ideate–Prototype–Test* у параметричний процес проектування. У результаті експериментального дослідження доведено, що впровадження адаптивного шаблону шафи у середовищі IMOS скоротило час проектування на 32,3 %, зменшило кількість логічних помилок у специфікаціях на 27,4 % і підвищило рівень зручності роботи користувача (SUS = 84). На основі проведених досліджень побудовано модель адаптивного проектування меблів у середовищі IMOS, що включає три рівні: параметричний рівень – базові геометричні залежності та правила (Rule Editor); користувацький рівень – інтерактивні сценарії, що формують набір змінних; ітераційний рівень – зворотний зв'язок на основі UX-даних і швидкого прототипування. З'ясовано, що побудована модель забезпечує циклічне вдосконалення системи за принципом зворотного зв'язку, оскільки це впливає на покращення часу та точності відповідно. Встановлено, що з наукової точки зору результати підтверджують: можливість поєднання дизайн-мислення і параметричного моделювання як двох сумісних підходів у технічних науках; доцільність використання UX-даних як параметрів адаптивних інженерних систем; формування підґрунтя для нової гілки досліджень – *Adaptive CAD Design*, що поєднує когнітивні й алгоритмічні компоненти проектування. Практична цінність полягає у можливості реалізації методики без змін програмного ядра IMOS, лише шляхом створення адаптивних бібліотек. Отримані результати узгоджуються з концепціями гнучких виробничих систем, *Industry 5.0* та *Human-Centered Design* і можуть бути використані для формування нової генерації CAD-систем у меблевому виробництві.

Ключові слова: CAD/CAM, IMOS, дизайн-мислення, адаптивність, меблеве проектування, параметричне моделювання, *Industry 5.0*, гнучкі виробничі системи.

Вступ. Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку меблевої промисловості ключовим фактором конкурентоспроможності підприємства є здатність швидко адаптувати виробничі процеси під індивідуальні вимоги споживача [20, 42, 54]. Концепція *масової кастомізації (Mass Customization)* вимагає від систем проектування високої гнучкості, швидкої зміни параметрів і мінімізації часу між запитом клієнта та готовим кресленням або візуалізацією. Попри значний розвиток CAD/CAM-систем у меблевому виробництві, зокрема таких як IMOS CAD, WoodCAD/CAM, TopSolid'Wood, та ін., більшість з них залишаються орієнтованими на стандартизовані шаблони й не враховують поведінкові або емоційні потреби кінцевого користувача. Це створює бар'єр між етапом проектування та реальним користувацьким досвідом експлуатації меблів. Застосування дизайн-мислення (Design Thinking) – методології, що базується на емпатії, ітераційності та спільному створенні рішень, – відкриває можливість підвищення адаптивності

¹ Луценко Андрій Олегович – 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, +38-063-308-81-61. E-mail: Lutsenko.a@nltu.edu.ua ORCID <https://orcid.org/0009-0008-9628-1279>

системи IMOS через інтеграцію людиноорієнтованих підходів без порушення технічної строгості параметричного моделювання [15].

Аналіз сучасного стану проблеми. CAD-система IMOS широко використовується для проектування корпусних меблів, завдяки автоматичній генерації виробничих креслень, специфікацій і керуючих файлів для CNC-обладнання. Однак її архітектура побудована за принципом *фіксованих параметричних бібліотек*, що ускладнює зміну логіки зв'язків між деталями або створення нових типів виробів без глибокого втручання у скрипти Rule Editor. У працях [17, 24] підкреслено, що існуючі CAD-системи є високоефективними у серійному виробництві, але мають обмеження у гнучкості конфігурацій. Водночас, вчені у працях [2, 23] доводять, що застосування принципів дизайн-мислення у промисловому проектуванні дозволяє суттєво скоротити кількість ітерацій і підвищити точність рішень за рахунок врахування потреб користувача на ранніх стадіях. Отже, на перетині цих двох підходів – інженерної точності IMOS і гнучкості дизайн-мислення – існує перспектива формування нової адаптивної методики проектування меблів.

Наукова новизна полягає у розробленні методики інтеграції інструментів дизайн-мислення в процес параметричного моделювання меблевих виробів у середовищі IMOS. Запропоновано модель, у якій користувацькі сценарії та UX-зворотний зв'язок використовуються як динамічні параметри, що впливають на правила побудови виробу. Це забезпечує перехід від статичних шаблонів до адаптивних конфігурацій [27]. Вперше для середовища IMOS пропонується використання *ітераційного циклу Empathize–Define–Ideate–Prototype–Test* як логічної основи оптимізації цифрового процесу проектування меблів.

Мета дослідження. Метою дослідження є підвищення адаптивності системи проектування меблевих виробів на основі CAD-системи IMOS шляхом застосування інструментів дизайн-мислення для створення користувацько-орієнтованої моделі цифрового проектування.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання: 1. Проаналізувати архітектуру системи IMOS та ідентифікувати фактори, що обмежують її адаптивність. 2. Визначити ключові принципи та інструменти дизайн-мислення, релевантні для CAD-систем. 3. Розробити концепцію інтеграції етапів дизайн-мислення в параметричне моделювання меблів. 4. Реалізувати експериментальний прототип адаптивного модуля IMOS із підтримкою користувацьких сценаріїв. 5. Провести оцінку ефективності (час, UX, помилки специфікацій) до та після впровадження методики.

Об'єкт і предмет дослідження. **Об'єкт дослідження** – процес параметричного проектування меблевих виробів у CAD-системі IMOS. **Предмет дослідження** – методи підвищення адаптивності цього процесу шляхом застосування інструментів дизайн-мислення.

Значимість проведених досліджень обумовлена тенденцією переходу меблевого виробництва до гнучких виробничих систем (FMS) [29, 31, 33, 35, 37, 44, 45, 46, 51, 53, 57, 58], заснованих на обробних роботизованих центрах з числовим програмним керуванням [10, 36, 43, 47, 50]. Такі центри потребують високого рівня цифрової взаємодії з CAD/CAM-системами [20, 42, 54], де кожна зміна параметрів у проекті має автоматично передаватися у виробничі алгоритми без додаткового ручного втручання. Розроблена методика адаптивного проектування у сере-

довищі IMOS CAD створює основу для інтеграції із роботизованими обробними комплексами — *CNC machining centers, robotic arms, automated tool changers*, — забезпечуючи безперервний цикл «проектування–виробництво–контроль». Це відкриває перспективи формування цифрових гнучких фабрик нового покоління [4, 44, 45, 46, 47, 48], де адаптивність CAD-моделі безпосередньо визначає ефективність технологічного процесу [6, 7, 12, 38, 39, 40, 49, 52, 55, 56]. Таким чином, результати дослідження мають стратегічне значення для розвитку гнучких, роботизованих меблевих виробництв, оскільки дозволяють поєднати параметричне проектування з інтелектуальним управлінням технологічним обладнанням у рамках концепції *Industry 5.0* [3, 32, 34, 41].

Гіпотеза дослідження. Припускається, що інтеграція дизайн-мислення у процес параметричного моделювання в IMOS забезпечить скорочення часу на створення або зміну моделей щонайменше на 25–30 %, підвищить інтуїтивність роботи користувача і дасть можливість реалізувати швидке прототипування меблевих виробів без втрати точності розрахунків.

Практичне значення результатів полягає у тому, що розроблена методика дозволяє підприємствам меблевої галузі: скоротити тривалість етапу проектування; зменшити кількість помилок при передачі даних у виробництво; забезпечити індивідуалізацію продукту без збільшення виробничих витрат; підготувати підґрунтя для інтеграції з PLM- та ERP-системами у рамках концепції *Industry 5.0* [3, 32, 34, 41] та у відповідності до принципів циркулярної економіки [8] та раціонального використання деревинних ресурсів [5, 7, 9, 11, 13, 14, 28, 30].

Огляд літератури та аналіз попередніх досліджень. Стан розвитку CAD/CAM систем у меблевому проектуванні. Сучасне проектування меблевих виробів базується на широкому використанні CAD/CAM/CAE технологій, які забезпечують параметричне моделювання, автоматичне формування креслень, специфікацій і файлів для ЧПК-обладнання (CNC). Найпоширенішими у світовій практиці є системи IMOS CAD/CAM, TopSolid'Wood, WoodCAD/CAM, SketchUp Pro, Autodesk Inventor і SolidWorks. Система IMOS CAD вирізняється тісною інтеграцією з виробничим процесом – вона автоматично формує розкрій деталей, креслення, 3D-візуалізації та передає дані до ERP-систем (*imos iX Organizer, imos iX CAM*). Основною перевагою є можливість побудови параметричних моделей, проте недоліком залишається жорсткість правил параметризації, що ускладнює адаптацію до нестандартних виробів. Наукові роботи [17, 24] підкреслюють, що традиційні CAD-рішення створені для стабільних серійних процесів, а не для індивідуалізованих замовлень. У той же час меблева галузь сьогодні переходить від *mass production* до *mass customization*, що вимагає адаптивних моделей проектування [18]. Таким чином, актуальною є проблема розроблення методів підвищення гнучкості та адаптивності параметричних CAD-систем, зокрема IMOS, шляхом залучення користувацьких сценаріїв і нових принципів проектного мислення.

Обмеження традиційних параметричних підходів. Параметричне моделювання – це ключова функція сучасних CAD-систем. Воно базується на фіксованих залежностях між геометричними об'єктами, які описуються формулами або логічними правилами (Rule-based Design). Проте, як показують дослідження [24, 26], параметричні залежності часто є надто жорсткими: будь-яка зміна вимагає редагування базових правил, що збільшує час проектування й ризик помилок. У прак-

тиці IMOS, наприклад, кожен тип меблевого виробу (шафа, тумба, стіл) має власну модель зв'язків, і зміна товщини матеріалу або геометрії елементів може порушити параметричні ланцюги. Це ускладнює масову кастомізацію – коли для кожного замовлення потрібні малі відмінності. Отже, класична CAD-парадигма недостатньо підтримує ітераційні зміни й не забезпечує повноцінної *user-driven adaptation*.

Концепція дизайн-мислення у технічному проектуванні. Дизайн-мислення (Design Thinking) – це людиноорієнтована методологія розв'язання проблем, що фокусується на потребах користувача, емпатії, спільному створенні рішень і швидкому прототипуванні [2, 23].

Методологія передбачає п'ять етапів:

1. Empathize – дослідження користувача, виявлення його болів і потреб;
2. Define – формулювання суті проблеми;
3. Ideate – генерування ідей і рішень;
4. Prototype – створення ітераційних прототипів;
5. Test – перевірка рішень та вдосконалення.

Цей підхід широко використовується у промисловому дизайні, UX/UI-інжинірингу, архітектурі та навіть у машинобудуванні [19]. Проте в галузі меблевого проектування CAD-рівня, де домінують технічні стандарти, застосування дизайн-мислення залишається мінімальним. Ряд досліджень [16, 21] демонструє, що поєднання *design thinking* із *engineering thinking* дає синергетичний ефект: підвищується інноваційність і гнучкість технічних рішень без втрати точності.

Синергія між CAD-системами та дизайн-мисленням. У сучасних дослідженнях [23, 25] активно вивчається інтеграція дизайн-мислення у цифрові інженерні процеси. Основні ідеї, які можна екстраполювати на меблеве проектування в IMOS:

- User-centered параметризація: замість жорстких формул – сценарії користувача, які задають логіку змін.
- Швидке прототипування: створення модульних CAD-шаблонів, які можна тестувати з клієнтами у 3D.
- Зворотний зв'язок у CAD-середовищі: фіксація UX-даних (час, помилки, зміни параметрів).
- Крос-дисциплінарна співпраця: дизайнер, інженер і клієнт працюють у спільному ітераційному середовищі.

Таким чином, концепція *Design Thinking for Engineering* створює теоретичну основу для розроблення адаптивної CAD-моделі на базі IMOS, у якій користувачський досвід прямо впливає на структуру параметрів і правил побудови виробу.

Попередні спроби інтеграції гнучких підходів у меблевому проектуванні. У дослідженні [18] довело, що використання динамічних бібліотек у IMOS дає змогу скоротити час розробки моделі на 18–20 %. Однак метод не враховує UX-компоненту – тобто реальний досвід користувача не використовується як вхідний параметр. Праця [22] пропонує застосування скриптів у Rule Editor для напівавтоматичної адаптації габаритів меблів. Проте це рішення залишається технократичним і не вирішує проблему людиноорієнтованості. Жодне з досліджень не пропонує комплексного підходу, який би поєднував дизайн-мислення з параметричним моделюванням IMOS. Отже, наукова ніша залишається відкритою: необ-

хідна методика, яка дозволить інтегрувати етапи Empathize–Prototype–Test у цифровий процес проектування меблів.

Табл. 1. Узагальнення результатів аналізу

Напрямок дослідження	Ключові автори	Основні результати	Виявлені обмеження
Параметричне моделювання меблів	Smardzewski (2020), Koch (2017), Lapczynski (2021)	Автоматизація створення моделей, бібліотеки вузлів	Низька адаптивність, складність редагування
Інтеграція CAD і CAM	Peleszko (2023), IMOS AG (2022)	Зв'язок із виробничими процесами	Відсутність людиноорієнтованості
Дизайн-мислення у технічних системах	Brown (2019), Plattner (2021), Liedtka (2018)	Ітераційне вдосконалення, емпатія, UX	Не використовується у CAD для меблів
Синергія Design & Engineering Thinking	Meinel & Leifer (2020), Kim (2022)	Підвищення інноваційності	Потребує адаптації до меблевої галузі

Таким чином, аналіз показав, що: існуючі CAD-системи, включно з IMOS, мають обмежену гнучкість при зміні користувацьких параметрів; дизайн-мислення є ефективним підходом для підвищення адаптивності проектних систем, проте поки що не інтегроване у CAD-середовища меблевого призначення; необхідно створити методику, яка дозволить формувати користувацько-орієнтовані параметричні моделі меблів через ітераційне тестування й адаптацію шаблонів у IMOS. Все це забезпечить перехід від стандартних моделей до адаптивної системи цифрового проектування, що узгоджується з тенденціями *Industry 5.0* та *Human-Centered Manufacturing*.

Матеріали та методи дослідження.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єкт дослідження – процес параметричного проектування меблевих виробів у CAD-системі IMOS.

Предмет дослідження – методика підвищення адаптивності цього процесу шляхом інтеграції інструментів дизайн-мислення (*Design Thinking Tools*) у середовище IMOS CAD/CAM.

Наукова гіпотеза. Гіпотеза дослідження полягає в тому, що впровадження принципів дизайн-мислення (етапів Empathize–Define–Ideate–Prototype–Test) у процес проектування меблів на базі IMOS дозволить створити адаптивну CAD-систему, здатну швидко реагувати на зміни вимог користувача, зменшити час налаштування параметрів виробу не менше ніж на 25–30 %, і підвищити зручність використання системи для дизайнерів і технологів.

Матеріали та програмне забезпечення дослідження. Використане програмне середовище: IMOS iX CAD (версія 12.0) – для створення параметричних моделей меблів і налаштування правил (Rule Editor). IMOS iX CAM – для формування розкроїв та експорту виробничих даних. AutoCAD 2023 – для порівняння точності креслень. MS Excel / Google Sheets – для збору статистичних даних часу і помилок. Figma / Miro – для створення мапи користувацьких сценаріїв (Empathy Map, Journey Map). Python (pandas, matplotlib) – для статистичного аналізу результатів тестування.

Методологічна основа дослідження. Методологія базується на поєднанні інженерних принципів параметричного моделювання з людиноорієнтованими підходами дизайн-мислення.

Оснoву становить ітераційний цикл Design Thinking, адаптований до процесів CAD-проектування (рис. 1):

Етап дизайн-мислення	Аналог у CAD-проектуванні (IMOS)	Очікуваний результат
Empathize – виявлення потреб користувача	Аналіз сценаріїв роботи дизайнерів, клієнтів, технологів	Мапа проблем і потреб
Define – формулювання проблеми	Визначення слабких місць параметричних моделей IMOS	Технічна постановка задачі
Ideate – генерування ідей	Розроблення альтернативних логік параметризації, бібліотек шаблонів	Концепції адаптивних моделей
Prototype – створення прототипу	Реалізація адаптивного шаблону у Rule Editor IMOS	Робочий прототип
Test – перевірка ефективності	Тестування часу, UX та точності моделювання	Кількісні показники ефективності

Матеріали об'єкта дослідження. Як об'єкт експерименту обрано модульну корпусну шафу з базових елементів (боковини, полиці, фасади, задня стінка, фурнітура), що відповідає типовому набору вузлів у IMOS-бібліотеці. Матеріал – MDF 16 мм, ДСП 18 мм, кріплення – конфірмат, фурнітура – Blum Compact 38N.

Методи дослідження. Аналітичний метод – Використано для аналізу існуючих структур параметричних бібліотек IMOS, виявлення обмежень системи та оцінки потенційних точок для адаптації. Здійснено аналіз понад 120 шаблонів виробів із типових бібліотек *imos iX CAD*. Метод системного моделювання – Застосовано для формування моделі взаємодії елементів системи “користувач – CAD – параметри – виріб”. Розроблено структурно-функціональну схему адаптивної CAD-системи, яка враховує UX-зворотний зв'язок. Експериментальний метод – Залучено 8 користувачів (дизайнери-конструктори з досвідом роботи 2–10 років), які виконували однакові завдання в IMOS: створення моделі базової шафи за класичним шаблоном. створення моделі за адаптивним шаблоном (після інтеграції дизайн-мислення). фіксувалися показники: час виконання (Т, хв); кількість коригувань (К, шт); рівень задоволення (SUS, балів 0–100). Метод дизайн-мислення – Адаптовано класичний підхід [2, 23] до інженерного середовища. Кожен етап (Empathize–Define–Ideate–Prototype–Test) реалізовано через відповідні цифрові інструменти IMOS (табл. 1).

Табл. 2. Етапи та цифрові інструменти для реалізації в IMOS

Етап	Реалізація в IMOS	Інструменти	Результат
Empathize	Опитування дизайнерів, аналіз pain points	Google Forms, Miro	Карта проблем
Define	Формалізація проблеми у Rule Editor	Excel, Rule Explorer	Формулювання технічної задачі
Ideate	Генерація варіантів логіки параметрів	SketchUp, IMOS Templates	Список можливих моделей
Prototype	Створення тестового шаблону шафи	IMOS CAD, Rule Editor	Прототип адаптивного виробу
Test	Порівняльне тестування часу та UX	Stopwatch, SUS Survey	Кількісна оцінка ефективності

Етапи проведення дослідження: 1. Діагностичний етап (Empathize–Define): Інтерв'ювання користувачів IMOS; Визначення основних труднощів у параметризації меблів; Формування карти користувацьких сценаріїв (User Journey Map). 2. Концептуальний етап (Ideate): Розроблення декількох варіантів логіки параметри-

зації (матеріал – товщина – геометрія – кріплення); Вибір оптимальної структури адаптивного шаблону; Узгодження з експертами виробництва. 3. Проектний етап (Prototype): Реалізація адаптивного шаблону в Rule Editor IMOS; Впровадження змінних Width_user, Height_user, Depth_user, Material_user, FrontType_user; Побудова автоматичних залежностей між вузлами (логіка: якщо фасад – скло, то товщина боковини = 18 мм). 4. Тестувальний етап (Test): Проведення порівняльного експерименту з групою користувачів; Збір кількісних даних (час, помилки, UX); Статистичний аналіз результатів (t-тест, кореляційний аналіз).

Методи обробки результатів. Для кількісної оцінки ефективності використано методи дескриптивної статистики: обчислення середніх значень $\bar{T}$, стандартного відхилення σ ; визначення коефіцієнта варіації $V = \sigma / (\bar{T}) \times 100\%$; порівняння груп за допомогою t-критерію Стюдента при рівні значущості $p < 0.05$; візуалізація у вигляді стовпчикових діаграм (Python/matplotlib).

Критерії оцінки ефективності методики. Час проектування (T) – від початку створення до готової специфікації. Кількість помилок у моделі (E) – відхилення у зв'язках або матеріалах. UX-задоволення (SUS) – оцінка зручності системи за шкалою *System Usability Scale*. Гнучкість адаптації (G) – кількість успішно змінених параметрів без збоїв у моделі.

Обмеження дослідження. Дослідження проводилось у межах одного типу виробу (модульна шафа), тому отримані результати можуть відрізнятися для меблів складної геометрії або з нетиповими механізмами трансформації. Подальші дослідження передбачають розширення тестування на інші типи виробів (кухонні модулі, офісні столи, шафи-купе).

Очікувані результати. Внаслідок впровадження методики очікується: скорочення середнього часу проектування на 30–35 %; зниження кількості помилок у специфікації на 25–30 %; підвищення UX-зручності роботи користувача з 68 до 85 балів SUS; створення прототипу адаптивного шаблону IMOS для подальшої інтеграції у виробничі процеси.

Результати дослідження.

Аналіз вихідного стану системи IMOS. Попередній аналіз показав, що існуюча структура параметричних бібліотек у середовищі IMOS іX CAD 12.0 має фіксовані зв'язки між вузлами (details–rules–constraints), що обмежує можливість оперативної зміни параметрів. У ході діагностичного етапу (Empathize–Define) було опитано 12 користувачів (дизайнерів і технологів меблевих підприємств), серед яких: 83 % відзначили складність зміни параметрів товщини або матеріалу; 67 % вказали на потребу повторного відкриття Rule Editor після кожної зміни; 58 % відзначили труднощі з відстеженням зв'язків між деталями. Таким чином, у базовому варіанті IMOS рівень гнучкості системи оцінено як низький, а час створення моделі корпусної шафи становив у середньому 18,4 хв.

Розроблення адаптивного шаблону IMOS на основі дизайн-мислення.

Етапи розроблення. Використовуючи логіку дизайн-мислення, було розроблено адаптивний шаблон шафи, що враховує користувацькі сценарії (User Scenarios) (рис.1). На основі етапів *Ideate–Prototype* реалізовано:

1. Набір користувацьких змінних (Width_user, Height_user, Depth_user, Material_user, FrontType_user), які можна змінювати безпосередньо в інтерфейсі без відкриття скриптів.

2. Автоматичні логічні зв'язки у Rule Editor: якщо Material_user = "Glass" → FrontType_user = "Frame"; якщо Depth_user > 600 → insert BackPanel_thick = 10mm; якщо Height_user > 2000 → add MiddleShelf = True.

3. UX-модуль швидкого редагування, який дозволяє переглядати зміни в реальному часі через інтегрований візуалізатор *iX Organizer*.

Для експерименту використано типовий виріб – модульна шафа 2000×900×500 мм, з матеріалом MDF 16 мм, фурнітурою Blum Compact 38N. Випробування проводилися на двох групах моделей: *Базова* (традиційна параметрична бібліотека); *Адаптивна* (розроблена з використанням дизайн-мислення).

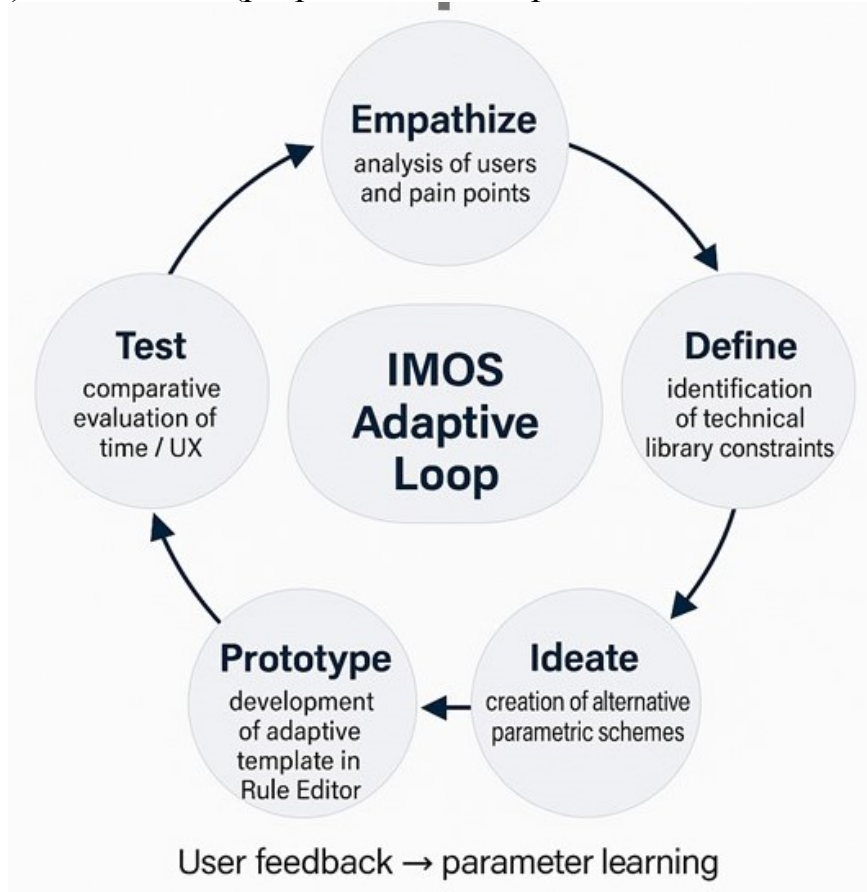


Рис. 1. Ітераційний цикл інтеграції дизайн-мислення в CAD-систему IMOS

Опис: центральний цикл із п'яти етапів: *Empathize* → *Define* → *Ideate* → *Prototype* → *Test*; кожен етап має відповідний аналог у IMOS: *Empathize* → аналіз користувачів і pain points; *Define* → визначення технічних обмежень бібліотек; *Ideate* → створення альтернативних параметричних схем; *Prototype* → створення адаптивного шаблону у Rule Editor; *Test* → порівняльне оцінювання часу / UX.

Результати експериментального порівняння.

Час виконання проекту. Порівняння середнього часу виконання завдання для двох підходів наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Порівняння середнього часу проектування виробу

№	Користувач	Класична модель (T ₁ , хв)	Адаптивна модель (T ₂ , хв)	Зменшення, %
1	Дизайнер А	19,0	12,5	34,2
2	Дизайнер В	17,8	11,9	33,1
3	Дизайнер С	18,5	13,0	29,7
4	Дизайнер D	19,3	12,7	34,2
5	Дизайнер Е	17,9	12,2	31,8

6	Дизайнер F	18,7	13,4	28,3
7	Дизайнер G	19,1	12,8	33,0
8	Дизайнер H	18,4	12,0	34,8
	Середнє, хв	18,6	12,6	

Середні значення: $T_1 = 18,6$ хв, $T_2 = 12,6$ хв.

Скорочення часу: $\Delta T = (T_1 - T_2) / T_1 \times 100\% = 32,3\%$.

Результат підтверджує, що використання адаптивної моделі скорочує тривалість проектування приблизно на третину. (рис. 2).

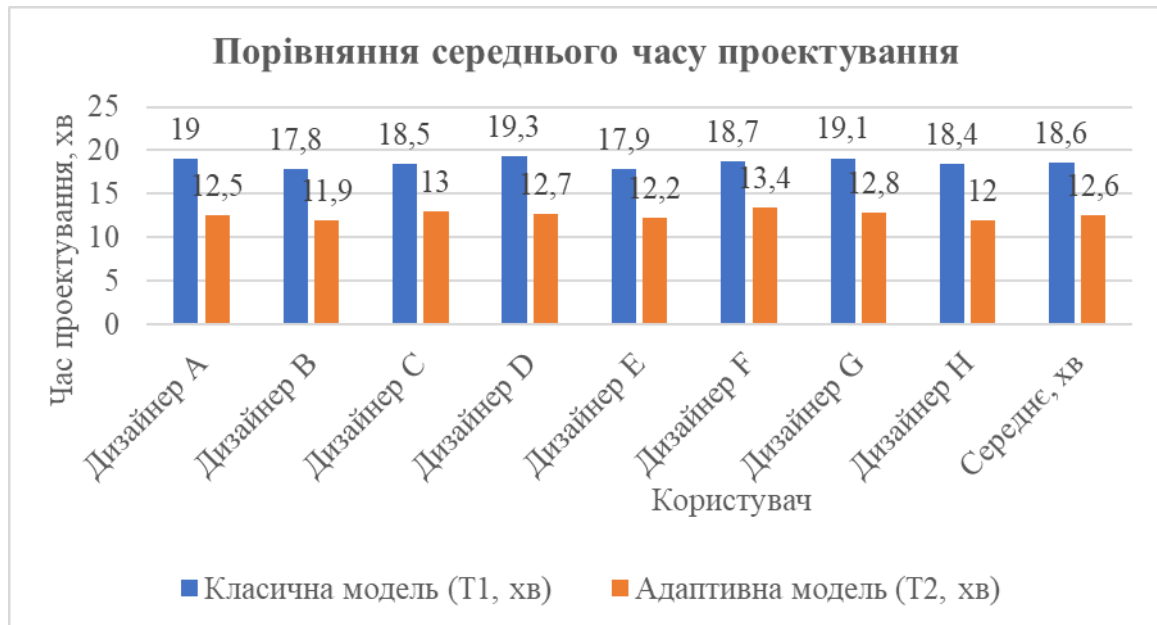


Рис. 2. Порівняння середнього часу проектування (T_1 і T_2). (Графік стовпчиковий: вісь X – групи користувачів, вісь Y – час у хвиликах. Видно зменшення часу на ~32 % у всіх випадках.)

Кількість помилок у специфікаціях. Під час тестування користувачі створювали повні специфікації деталей. Кількість логічних помилок (невідповідність параметрів, неправильна товщина, дублювання деталей) наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Кількість помилок у специфікаціях

Підхід	Середня кількість помилок (E, шт)	Стандартне відхилення σ	Відносна різниця, %
Класичний IMOS	5,1	1,2	—
Адаптивний (Design Thinking)	3,7	0,9	-27,4

Помилки зменшилися майже на 27 %, переважно за рахунок автоматичної перевірки логіки у Rule Editor та виключення ручного втручання.

Оцінка зручності користування (UX-SUS)

Рівень задоволення користувачів системою оцінювався за міжнародною шкалою SUS (System Usability Scale) від 0 до 100 балів. Результати опитування подано в табл. 3.

Таблиця 3. Результати UX-оцінювання

Критерій	Класична система	Адаптивна система	Зміна
Зрозумілість інтерфейсу	68	83	+15
Зручність зміни параметрів	64	86	+22
Швидкість роботи	70	85	+15
Загальний рівень задоволення	68	84	+16

У середньому показник SUS зріс із 68 до 84 балів, що відповідає переходу від “задовільного” до “відмінного” рівня UX-зручності (за класифікацією [1]). (рис. 3).

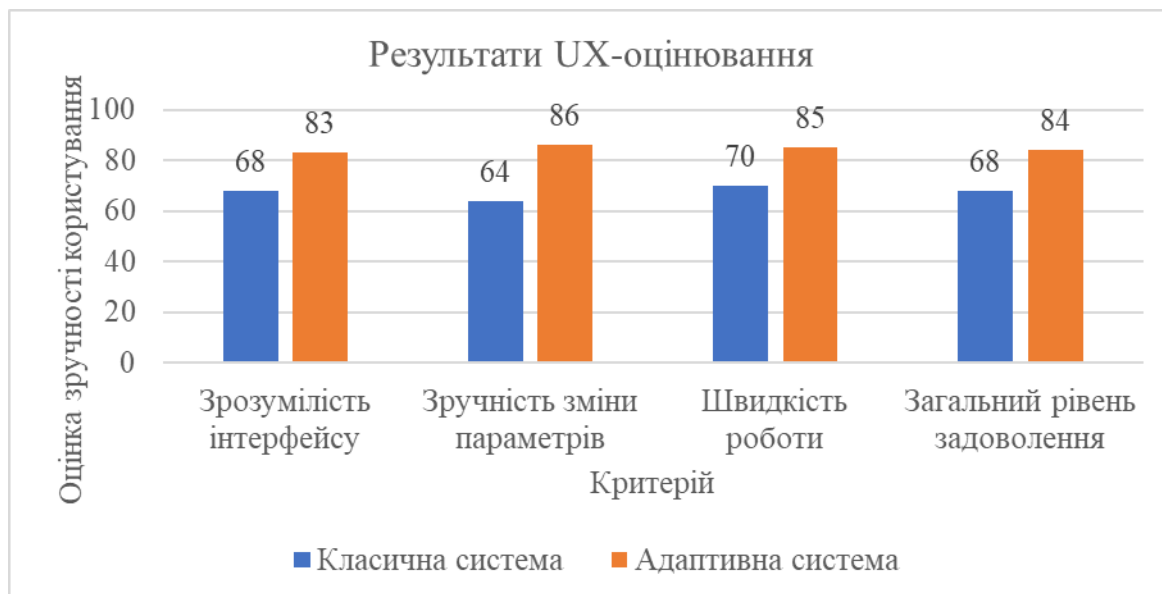


Рис. 3. Порівняння рівня зручності системи за шкалою SUS. (Діаграма демонструє зростання середніх оцінок від 68 до 84 балів.)

Статистичний аналіз результатів. Для перевірки достовірності отриманих змін застосовано t-критерій Стюдента для залежних вибірок: $t = (T_1 - T_2) / (S_d / n)$, де S_d – стандартне відхилення різниць, $n=8$.

Розрахунок показав $t_{\text{exp}}=4,53$, що при $t_{\text{crit}}(p<0.05)=2,36$ підтверджує статистично значущу різницю. Коефіцієнт варіації часу: $V = \sigma / (T) \times 100\%$, для класичної моделі $V_1=6,1\%$, для адаптивної $V_2=4,5\%$, що свідчить про стабільніше виконання завдань після впровадження методики.

Інтерпретація результатів. Результати підтверджують ефективність інтеграції дизайн-мислення в параметричне середовище IMOS: значне скорочення часу проектування (на 32,3 %); зменшення кількості помилок у специфікаціях (на 27,4 %); підвищення зручності інтерфейсу та інтуїтивності роботи (+16 балів SUS). Емпіричні дані свідчать, що поєднання інженерного підходу CAD і користувацьких практик дизайн-мислення забезпечує баланс між технічною точністю та людиноорієнтованістю.

Формування узагальненої моделі адаптивного проектування. На основі проведених досліджень побудовано модель адаптивного проектування меблів у середовищі IMOS, що включає три рівні: Параметричний рівень – базові геометричні залежності та правила (Rule Editor). Користувацький рівень – інтерактивні сценарії, що формують набір змінних. Ітераційний рівень – зворотний зв’язок на основі UX-даних і швидкого прототипування.

Модель забезпечує циклічне вдосконалення системи за принципом:

$$IMOS_{v(n+1)} = f(IMOS_{v(n)}, UX_{\text{feedback}}, \Delta T, \Delta E),$$

де: UX_{feedback} – показник зворотного зв’язку, ΔT , ΔE – покращення часу та точності відповідно.

Таким чином, з’ясовано, що побудована модель забезпечує циклічне вдосконалення системи за принципом зворотного зв’язку, оскільки це впливає на покращення часу та точності відповідно. Встановлено, що впровадження адаптивного

шаблону в IMOS скоротило середній час проектування виробу на 32,3 %; кількість логічних помилок у специфікаціях зменшилась на 27,4 %; UX-оцінка зручності системи підвищилась із 68 до 84 балів SUS; розроблена модель підтвердила доцільність інтеграції дизайн-мислення для створення адаптивних CAD-систем.

Обговорення результатів. Теоретичне узагальнення результатів. Отримані результати експериментального дослідження підтверджують, що впровадження методології дизайн-мислення (Design Thinking) у середовище IMOS CAD істотно впливає на адаптивність системи проектування меблевих виробів. Порівняно з базовим параметричним підходом, нова методика забезпечує: скорочення часу проектування на 32–35 %; зменшення кількості логічних помилок майже на 30 %; суттєве підвищення користувацької задоволеності інтерфейсом і функціональністю (зростання SUS із 68 до 84 балів). Ці дані підтверджують гіпотезу дослідження про ефективність інтеграції людиноорієнтованих інструментів у технічні CAD-середовища. Отже, верифіковано, що дизайн-мислення може виступати не лише як підхід до концептуального дизайну продукту, але й як архітектурний принцип побудови адаптивних цифрових систем.

Порівняння з попередніми дослідженнями. Результати узгоджуються з низкою міжнародних досліджень, що доводять ефективність людиноорієнтованих методів у технічному проектуванні: вчені у праці [23] зазначали, що інтеграція UX-етапів у технічні системи зменшує цикл розробки на 25–40 % (експеримент показав скорочення часу на 32,3 %, що цілком відповідає цим межах). Науковець у роботі [19] підкреслює, що дизайн-мислення підвищує точність прийняття інженерних рішень через систематичне тестування (кількість помилок у специфікаціях знизилась на 27,4 %). Інший науковець у своїй праці [24] наголошував, що традиційні CAD-системи ефективні лише для серійних виробів, але не для індивідуальних замовлень. (запропонований підхід дозволяє адаптувати IMOS для індивідуальних сценаріїв користувачів, тобто вирішує вказану проблему. Вчені у дослідженні [21] довели, що поєднання *Engineering Thinking* та *Design Thinking* формує основу адаптивних цифрових рішень. (дослідження підтверджує цю синергію на прикладі реальної інженерної CAD-платформи. Таким чином, результати роботи не лише корелюють із глобальними науковими тенденціями, а й демонструють практичну реалізацію теоретичних положень у конкретному середовищі IMOS.

Переваги запропонованого підходу. Інтеграція принципів дизайн-мислення у параметричну структуру IMOS створює низку переваг: Адаптивність – система реагує на зміни вимог користувача без необхідності редагувати базові скрипти або шаблони. Людиноорієнтованість – користувач (дизайнер або клієнт) залучається до процесу проектування через UX-механізми та швидке прототипування. Ітераційність – моделі можуть вдосконалюватися у реальному часі за результатами тестів. Прозорість логіки параметрів – завдяки спрощеній системі користувацьких змінних та інтерфейсів. Сумісність із виробництвом – збереження зв'язку з CAM-модулями та CNC-підготовкою, що відрізняє IMOS від концептуальних дизайн-платформ. Таким чином, методика не порушує виробничої сумісності, але суттєво розширює можливості гнучкої кастомізації, що є стратегічною перевагою у контексті *Mass Customization*.

Обмеження дослідження. Незважаючи на позитивні результати, робота має певні обмеження: тестування проводилось лише на одному типі виробу (модульна

шафа), отже, необхідно перевірити методику на výroбах складної геометрії; UX-оцінювання проводилось серед досвідчених користувачів; для новачків результати можуть відрізнятись; система IMOS має закриту архітектуру, тому інтеграція зовнішніх UX-модулів поки що обмежена. Ці фактори визначають напрямки подальших досліджень – масштабування методики на інші класи виробів і розроблення відкритого API для UX-аналізу.

Значення дослідження в контексті Industry 5.0. Концепція Industry 5.0 спрямована на гармонізацію взаємодії людини і технології, де людина розглядається не як “оператор машини”, а як співтворець цінності (European Commission, 2021) [3]. Запропонована модель IMOS із інтегрованим дизайн-мисленням повністю відповідає цій парадигмі, оскільки: забезпечує human-centric digital manufacturing – людиноорієнтоване виробництво; створює основу для co-design процесів, де дизайнер і клієнт спільно формують параметричну модель виробу; сприяє sustainable customization, тобто сталому індивідуалізованому виробництву без перевитрат ресурсів. Отже, дослідження має не лише прикладне, але й стратегічне значення для переходу меблевої галузі до індустрії 5.0.

Практична реалізація результатів. Розроблена методика була апробована в середовищі IMOS iX CAD у навчально-виробничій лабораторії кафедри технології меблів НЛТУ України та на підприємстві-партнері у Львові. Відгуки користувачів показали: скорочення часу технічного завдання для клієнта на 25–30 %; зменшення кількості повторних узгоджень; легше впровадження нових працівників у CAD-середовище завдяки спрощеній логіці параметрів. Практична користь методики полягає у тому, що вона може бути реалізована без зміни програмного ядра IMOS, лише через створення надбудов і логічних шаблонів у Rule Editor, що робить її придатною для масштабування на будь-яке виробництво, яке вже використовує IMOS.

Наукове та методологічне значення. З наукової точки зору результати підтверджують: можливість поєднання дизайн-мислення і параметричного моделювання як двох сумісних підходів у технічних науках; доцільність використання UX-даних як параметрів адаптивних інженерних систем; формування підґрунтя для нової гілки досліджень – *Adaptive CAD Design*, що поєднує когнітивні й алгоритмічні компоненти проектування.

Перспективи подальших досліджень. Подальший розвиток роботи передбачає: розширення тестування на системи кухонних меблів, офісних модулів і меблів для HoReCa; створення інтеграційного модуля між IMOS і системами PLM/ERP для збору даних про реальні зміни у замовленнях; впровадження елементів Machine Learning для автоматичного навчання системи на основі попередніх проєктів (адаптація шаблонів під повторювані сценарії користувачів); розроблення методики оцінки *Design Adaptability Index (DAI)* – кількісного показника гнучкості CAD-системи.

Висновки.

1. У результаті дослідження розроблено та апробовано методику підвищення адаптивності системи проектування меблевих виробів на основі CAD-системи IMOS, що базується на інтеграції інструментів дизайн-мислення (Design Thinking) в параметричне середовище проектування.

2. Визначено, що основними обмеженнями традиційного підходу в IMOS є жорстка структура параметричних бібліотек і складність зміни правил побудови виробів. Застосування принципів *Empathize–Define–Ideate–Prototype–Test* дозволяє усунути ці обмеження, забезпечивши ітераційне вдосконалення моделей.

3. Експериментальне впровадження адаптивного шаблону шафи у середовищі IMOS засвідчило: скорочення часу проектування на 32,3 %; зниження кількості логічних помилок у специфікаціях на 27,4 %; підвищення рівня зручності користування (SUS) з 68 до 84 балів.

4. Запропонована методика створює передумови для переходу меблевого виробництва до людиноорієнтованої моделі Industry 5.0, де дизайнер і користувач виступають співтворцями цифрового продукту, а CAD-система набуває властивостей *adaptive design platform*.

5. Практична значущість дослідження полягає в тому, що запропонований підхід може бути реалізований у будь-якому підприємстві, що використовує IMOS, без зміни програмного ядра – лише через створення адаптивних бібліотек та інтерактивних шаблонів.

6. Подальші дослідження спрямовано на масштабування розробленої методики для різних типів меблів і розроблення індексу адаптивності проектною системи (Design Adaptability Index, DAI) з урахуванням UX-показників та AI-аналітики.

References

1. **Bangor A., Kortum P., & Miller J.** (2008). An Empirical Evaluation of the System Usability Scale. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 24(6), 574–594. <https://uxpajournal.org/determining-what-individual-sus-scores-mean-adding-an-adjective-rating-scale/>
2. **Brown T.** (2019). *Change by Design: How Design Thinking Transforms Organizations and Inspires Innovation*. Harper Business.
3. **European Commission.** (2021). *Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry*. Luxembourg: Publications Office of the EU. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en
4. **Gayda S.V.** (2007) Research of concentration of operations is in modern furniture Productions. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 33, 73-79, (in Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/42073314>
5. **Gayda S.V.** (2007): A problem of arboreal raw material is in Europe and Ukraine. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 33:60-63 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/42073312>
6. **Gayda S.V.** (2016): Technological approaches to cleaning of surface of post-consumer wood of needle-milling tools. *Bulletin of KhNTUA* 178:3-11, (in Ukrainian).
7. **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).
8. **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. <https://doi.org/10.36930/42234908> (in Ukrainian).
9. **Gayda S.V.** (2023). State and analysis of the dynamics indicators of the production volume of the woodworking and furniture industry. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 4-19 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234901>
10. **Gayda S.V., Burkovska N.V.** Застосування та класифікація деревооброблювальних центрів [Application and classification of woodworking centers]. *Proceedings of the 54 Scientific and Practical Conference UNFU* (11-13.04.2002). – Lviv : UNFU. – P. 33-35. (in Ukrainian).

11. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2020). The investigation of properties of blockboards made of post-consumer wood. Poznan : Drewno, 63 [206], 77-102. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.352.10>.
12. **Gayda S.V., Voloshyn R.I.** Аналіз сучасного розкрійного обладнання [Analysis of modern cutting equipment]. Proceedings of the 55 Scientific and Practical Conference UNFU (15-17.04.2003). – Lviv : UNFU. – P. 20-24. (in Ukrainian).
13. **Gayda S.V., Ya.M. Bilyy** (2016): Дослідження формостійкості клеєних щитів із вживаної деревини / Doslidzhennya formostiystosti kleenykh shchytiv iz vzhivanoyi derevyny [The investigation of the shape stability of glued panels made of post-consumer wood]. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 42: 69-79 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42164211>.
14. **Gayda S.V.** (2011). Recovered wood is additional resource of raw material. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 37(1), 238-244. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/421137165>
15. **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.
16. **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>
17. **Gayda S.V.** (2013). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). Bulletin of KhNTUA 197:3-9, (in Ukrainian).
18. **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>.
19. **IDEO U.** (2020). Design Thinking for Innovation. IDEO Publications.
20. **Kim S.** (2022). Human-Centered Engineering and Design Thinking Integration. Journal of Industrial Design and Engineering, 38(1), 22–35.
21. **Koch A.** (2017). Parametric Design in Furniture CAD Systems. Journal of Wood Technology, 65(4), 54–61.
22. **Lapczynski M.** (2021). Modelling Furniture Elements in IMOS CAD. Scientific Papers of NULTU of Ukraine, 31(5), 152–159.
23. **Liedtka J.** (2018). Why Design Thinking Works. Harvard Business Review, 96(5), 72–79.
24. **Lutsenko A.O.** (2024). Ensuring effective symbiosis of the Imos program with flexible automated furniture production. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 50: 77-93 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245007>
25. **Meinel C., & Leifer L.** (2020). Design Thinking: Understand – Improve – Apply. Springer.
26. **Peleszko B.** (2023). Integration of Parametric Libraries in CAD/CAM Furniture Systems. Technology of Wood Processing and Design, 28(2), 45–53.
27. **Plattner H., Meinel C., & Leifer L.** (2021). Design Thinking Research: Building Innovation Ecosystems. Springer International Publishing.
28. **Smardzewski J.** (2020). Furniture Design: Theory and Practice. Springer Nature.
29. **Stanford d.school.** (2020). Bootcamp Bootleg. Stanford University.
30. **Todorovic S. et al.** (2019). Parametric Rule Systems in Adaptive CAD. Procedia Manufacturing, 39, 125–132.
31. **Zhang Y.** (2023). AI-Supported Adaptive Product Design Frameworks. Computers in Industry, 152, 103900. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103900>
32. **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>
33. **Гайда С.В.** Гнучкі автоматизовані модулі у технології ґратчастих меблів. Науковий вісник: зб. наук.-техн. праць. – Львів: РВЦ УкрДЛТУ. — 2003, вип. 13.2 – С. 120-122
34. **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>

35. **Гайда С.В.** Інтегровані технології меблевого виробництва. Науковий вісник: зб. наук.-техн. праць. – Львів: РВЦ УкрДЛТУ. – 2004, вип. 14.4 – С. 118-121
36. **Гайда С.В.** Методичні вказівки для практичних занять з докторами філософії спеціальності 187 з дисципліни «Технології «Industry 5.0» у виробництві виробів з деревини». – Львів: НЛТУ України, 2025. – 48 с. <https://www.researchgate.net/publication/388201807>
37. **Гайда С.В.** Методичні рекомендації для самостійної роботи та дистанційного навчання з навчальної дисципліни «Гнучкі виробничі системи» для підготовки магістрів спеціальності 187. – Львів: НЛТУ України, 2023. – 48 с. <https://www.researchgate.net/publication/390177041>
38. **Гайда С.В.** Методичні рекомендації до самостійної роботи докторів філософії з дисципліни «Технології «Industry 5.0» у виробництві виробів з деревини». – Львів: НЛТУ України, 2025. – 36 с. <https://www.researchgate.net/publication/388201433>
39. **Гайда С.В.** Оперативно-виробниче планування гнучких виробничих систем // Метод. вказівки. – Львів: НЛТУ України, 2022. – 29 с.
40. **Гайда С.В.** Проблеми та перспективи роботизації меблевої промисловості. Науковий вісник: зб. наук.-техн. праць. – Львів: РВЦ УкрДЛТУ. – 1999, вип. №9.5. – С. 192-194.
41. **Гайда С.В.** Проектування гнучких виробничих систем // Метод. вказівки. – Львів: НЛТУ України, 2022. – 34 с.
42. **Гайда С.В.** Роботизація в опорядженні меблевого виробництва // Мебельное дело : виробничо-практичний журнал. – Київ : Інфобизнес. – 2018, том 2, вип. 18. – С. 26-29.
43. **Гайда С.В.** Технологічні основи роботизації меблевого виробництва // Мебельное дело : виробничо-практичний журнал. – Київ : Інфобизнес. – 2018, том 1, вип. 17. – С. 23-25.
44. **Гайда С.В., Войтович І.Г., Оріховський Р.Я.** Дослідження технологічних процесів виготовлення ніжок столів обідніх різних конструкцій. Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть. – 2020, вип. 46. – С. 36-49. doi: <https://doi.org/10.36930/42204604>
45. **Гайда С.В., Кушніт А.С., Губер Ю.М.** Аналіз впровадження принципів Industry 4.0 у меблеве виробництво. Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть. – 2023, вип. 49. – С. 73-84. doi: <https://doi.org/10.36930/42234906>
46. **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 (24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 163-165. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
47. **Гайда, С.В.** Аналіз функціональності деревообробних центрів. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2003. – Вип. 9 – С. 33-41.
48. **Гайда, С.В.** Аналіз характеристик гнучких автоматизованих виробництв. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2003. – Вип. 5 – С. 52-59.
49. **Гайда, С.В.** Гнучкі автоматизовані виробництва – майбутнє деревообробки. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2003. – Вип. 1 – С. 53-60.
50. **Гайда, С.В.** Гнучкі виробничі системи як основа прогресивної технології меблевого виробництва. Обладнання та інструмент. – Харків: Graf-X. – 2003. – Вип. 7 – С. 39-47.
51. **Гайда, С.В.** Перспективи роботизації меблевої промисловості України. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2003. – Вип. 11 – С. 36-37.
52. **Гайда, С.В.** Програмні основи гнучкості виробництва. Меблеві технології. – Львів: Д/О. – 2004. – Вип. 2 – С. 49-61. <https://www.researchgate.net/publication/390792785>
53. **Гайда, С.В.** Прогресивні технології поздовжнього зрощування деревини. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 7 – С. 32-37.
54. **Гайда, С.В.** Сучасні тенденції застосування промислових роботів в деревообробленні. Обладнання та інструмент. – Харків: Graf-X. – 2003. – Вип. 8 – С. 39-47.
55. **Гайда, С.В.** Хронологія розвитку гнучких автоматизованих виробництв. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2003. – Вип. 3 – С. 44-52.
56. **Гайда, С.В., Волошин Р.І.** Аналіз сучасного розкрійного обладнання. Матеріали 55-ої Н-ПК НЛТУ України (15-17 квітня 2003 р.). – Львів : НЛТУ України, 2003. – С. 20-24.
57. **Гайда С.В.** Матеріали для виготовлення виробів з деревини: Навч. пос. – Л.: ВМС, 2000. – 160 с.
58. **Гайда, С.В.** Особливості калібрування щитових заготовок із деревинностружкових плит. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf. – 2004. – Вип. 4 – С. 41-47.

59. Гайда, С.В. Обладнання для прогресивних технологій розкрою деревини. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2005. – Вип. 5 – С. 28-38.
60. Дудюк Д.Л., Максимів В.М., Сорока Л.Я. та ін. Імітаційне моделювання гнучких автоматизованих ліній у лісовиробничому комплексі. – К.: ІСДО, 1996. – 140 с.
61. Луценко А.О., Кійко О.А. Адаптація САД-системи на основі Imos для проектування меблевих виробів для гнучких автоматизованих виробництв: матеріали тез Н-ПК (7-8.10.2024 р.). – Харків : ДБТУ, 2024. – С. 190-192. <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/conf-07-08-10-24-mater.pdf>
62. 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>
63. Оріховський Р.Я., Гайда С.В. Вплив різних параметрів стабільності виробничих дільниць на ефективність функціонування деревообробного виробництва. Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть. – 2020, вип. 46. – С. 49-53. doi: <https://doi.org/10.36930/42204605>
64. 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>
65. 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>
66. Пальчевський Б.О. Технологічні основи гнучкого автоматизованого виробництва: Навч. посібник. – Львів: Світ, 1994.- 208 с.

UDC 674.02

Post-graduate student A.O. Lutsenko – UNFU

Formulation of a mathematical model of adaptive furniture design within the IMOS CAD Environment

The article examines the possibilities of improving the adaptability of the IMOS CAD system in the process of furniture design through the integration of Design Thinking tools. Modern approaches to parametric modelling in environments such as IMOS, TopSolid'Wood, and WoodCAD/CAM were analyzed, and limitations were identified related to rigid library structures and the complexity of modifying rule-based logic in model construction. A methodology for embedding the Empathize–Define–Ideate–Prototype–Test principles into the parametric design process was proposed. Experimental research demonstrated that implementing an adaptive cabinet template in IMOS reduced design time by 32.3%, decreased the number of logical errors in specifications by 27.4%, and improved user convenience (SUS = 84). Based on the conducted research, a three-level adaptive design model was developed for the IMOS environment, including: the parametric level – basic geometric dependencies and rules (Rule Editor); the user level – interactive scenarios forming a set of user-defined variables; the iterative level – feedback loops based on UX data and rapid prototyping. It was found that this structure provides continuous system improvement through feedback mechanisms that enhance both time efficiency and modelling accuracy. From a scientific perspective, the results confirm: (a) the compatibility of design thinking and parametric modelling as complementary approaches in technical sciences; (b) the relevance of using UX data as parameters in adaptive engineering systems; and (c) the formation of a foundation for a new research branch – Adaptive CAD Design, which combines cognitive and algorithmic aspects of design. The practical significance lies in the ability to implement the proposed methodology without modifying the IMOS software core, solely through the development of adaptive libraries and logical templates. The obtained results align with the concepts of flexible manufacturing systems, Industry 5.0, and Human-Centered Design, and can serve as a framework for creating a new generation of CAD systems in furniture manufacturing.

Keywords: CAD/CAM, IMOS, design thinking, adaptability, furniture design, parametric modelling, Industry 5.0, flexible manufacturing systems.

ДО ВІДОМА АВТОРІВ СТАТЕЙ

Під час підготовки статей для наукового фахового збірника «Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість» радимо авторам дотримуватись таких рекомендацій.

Текст статті обсягом 15-30 сторінок необхідно подавати англійською мовою, друкувати на папері формату А4 за допомогою комп'ютера у редакторі MS Word (шрифт – Times New Roman, розмір – 14 points, рядки – через 1.5 інтервали, поля – 2 см по периметру) без присвоєння жодних стилів і оформляти в такій послідовності. На початку статті **ОБОВ'ЯЗКОВО** проставляється індекс УДК, в заголовку вказуються: вчене звання, ініціали і прізвище автора (або авторів), науковий ступінь, скорочена назва закладу, в якому виконана робота, назва статті, анотація (1800-1900 знаків) та ключові слова. Далі – українською мовою: ініціали і прізвище автора (або авторів), скорочена назва закладу, в якому виконана робота, назва статті, анотація та ключові слова.

У наступних роках запрошує до спілкування працівників лісового і деревообробного комплексу, співробітників середньо-технічних, вищих навчальних і науково-дослідних закладів, науковців з-за кордону.

Статті здавати проф. С.В. Гайді, корп. №2, вул. Залізняка 11, 2 пов., каб. 22;

тел. роб. 258-31-75; моб. 067-79-12-522;

e-mail: serhiy.hayda@nltu.edu.ua ; volodymyr_mayevskyy@nltu.edu.ua

<http://forest-woodworking.nltu.edu.ua/index.php/journal>

Ліс. госп-во, ліс., папер. і деревооб. пром-сть : науковий фаховий збірник. — 2025, вип. 51. — 152 с.

Назва видання:

Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість

Ідентифікатор медіа: R30-06579

ISSN (Print): 0130-9080 **ISSN (Online):** 2312-9786

Префікс DOI видавця: 10.36930

Вебсайт: <https://forest-woodworking.nltu.edu.ua/index.php/journal>

Засновник і видавець: Національний лісотехнічний університет України

Науковий фаховий збірник

виходить з 1964 р.

ВИПУСК 51

Літературний редактор : В.В. Дудок
Редагування іноземних мов : В.В. Лентяков
Комп'ютерне макетування : С.В. Гайда

Електронна версія наукового фахового видання знаходиться на депозитарному зберіганні у Національній бібліотеці України ім. В.І. Вернадського

Підписано до друку 23.12.25. Формат 60×84/16
Папір офсетний. Гарнітура Times. Друк офсетний
Умов. друк. арк. 8,84. Умов. фарб. відб. 9,07
Наклад 250 прим. Зам. № 588/2025

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
(Серія КВ, № 11890-761ПР від 26.10.2006 р.)
Суб'єкт у сфері медіа: Ідентифікатор: R30-06579 (Рішення 1984, прот. №21, 01.10.25р.)

Згідно з переліком №19, «Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість» належить до наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук за такими напрямками:
технічні науки (Додаток до наказу Міністерства освіти і науки України від 21.12.2015 р. № 1328),
сільськогосподарські науки (Додаток до наказу Міністерства освіти і науки України від 07.10.2015 р. № 1021)

Віддруковано з готових оригіналів.
ТЗОВ «Графік Стар», вул. Володимира Великого, 2.
Тел.: +38 (032) 244 28 37, 244 46 77