

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ЛІСОТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

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

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

МІЖВІДОМЧИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Виходить з 1964 р.

ВИПУСК 50

Львів – 2024

УДК 691.11. Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість : міжвідомчий науково-технічний збірник. – Львів: НЛТУ України. – 2024, вип. 50. – 118 с.

Підготовлено НЛТУ України та рекомендовано до друку Вченою Радою (протокол №5 від 22.12.24 р.).

У збірнику наукових праць «Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість» опубліковано результати наукових досліджень, в яких **висвітлено** наукові досягнення в царині лісівництва та лісознавства, лісової та паперової промисловості, їхні актуальні проблеми сьогодення, **наведено** результати досліджень у сфері екології, відтворення та покращення стану лісових ресурсів, захисту лісів, проблеми раціонального природокористування, **висвітлено** нові аспекти лісової інженерії, ресурсоощадних та екологічнобезпечних деревообробних та меблевих технологій. Науково-технічний збірник **призначений** для наукових працівників, викладачів закладів освіти, широкого кола фахівців у сфері деревообробних та меблевих технологій, лісівництва, економіки галузі та екології лісу, лісової інженерії та лісопромислового комплексу.

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. Масєвський, д.т.н., проф.

Заступники голови редакційної колегії :

В.В. Лавний, д.с.-г.н., проф., С.В. Гайда, д.т.н., проф.

Склад редколегії : В.М. Атаманюк, д.т.н., проф., Б.Я. Бакай, к.т.н., доц., С.А. Гаврилюк, к.с.-г.н., доц., Я.В. Генік, д.с.-г.н., проф., І.Г. Грабар, д.т.н., проф., І.І. Делеган, к.с.-г.н., доц., С.В. Зібцев, д.с.-г.н., проф., О.В. Мокрицька, к.т.н., доц., О.А. Кійко, д.т.н., проф., В.В. Ковальова, к.б.н., доц., Р.О. Козак, д.т.н., проф., М.М. Король, к.с.-г.н., доц., Л.І. Копій, д.с.-г.н., проф., Г.Т. Криницький, д.б.н., проф., І.М. Крошний, к.т.н., доц., В.В. Куриляк, к.с.-г.н., доц., Б.Я. Кшивецький, д.т.н., проф., І.П. Мацях, д.б.н., асист., С.І. Миклуш, д.с.-г.н., проф., Г.Є. Ортинська, к.т.н., доц., Л.С. Осадчук, д.с.-г.н., проф., О.О. Пінчевська, д.т.н., проф., Б.П. Поберейко, д.с.-г.н., проф., Ю.М. Дебринюк, д.с.-г.н., проф., Ю.В. Цапко, д.т.н., проф., О.Г. Часковський, к.с.-г.н., доц., Л.А. Яремчук, д.т.н., проф., Ян Сідлячік, д.габ., проф., (Словаччина), Александер Пфрім, д.габ., проф., (Німеччина), Томаш Криштофіяк, д.габ., проф., (Польща), Петер Шпатгельф, д.габ., проф., (Німеччина), Єва Ратайчак, д.габ., проф., (Польща), Лілія Хогабом, д.габ., проф., (США), Ервін Гуссендюрфер, д.габ., проф., (Німеччина).

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, 2024

ЗМІСТ

1. WOODWORKING INDUSTRY // ДЕРЕВООБРОБНА ПРОМИСЛОВІСТЬ	4
С.В. Гайда // S.V. Gayda АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЕРЕВИНО-ЗАГОТОВЧОЇ ГАЛУЗІ В КОНТЕКСТІ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ // <i>Analysis of the trend of the main indicators of the wood processing industry in the context of the circular economy</i>	4
	15
Л.Е. Лесів, С.В. Гайда, Л.В. Салапак // L.E. Lesiv, S.V. Gayda, L.V. Salapak РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МІЦНОСТІ ЗРОЩЕНИХ ЗАГОТОВОК ІЗ ВЖИВАНОЇ ДЕРЕВИНИ ЯЛИЦІ // <i>Development of a mathematical model of the strength of joined preparations from post-consumer fir wood</i>	16
	28
С.В. Гайда // S.V. Gayda АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ПОКАЗНИКІВ ОСНОВНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В КОНТЕКСТІ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ // <i>Analysis of the dynamics of indicators of basic construction materials in the context of the circular economy</i>	29
	40
Р.Я. Оріховський, С.В. Гайда // R.Ya. Orikhovskyy, S.V. Gayda ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РОБОЧОГО ЧАСУ В АВТОМАТИЗОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМАХ ДЕРЕВООБРОБНОГО ВИРОБНИЦТВА // <i>Determination of runnibg time losses in automated processing systems of wood-working</i>	41
	51
С.С. Грицак // S.S. Grytsak ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ГНУТТЯ ДЕРЕВИНИ ЯСЕНА // <i>Study of the technological process of bending ash wood</i>	52
	64
Т.І. Подібка // T.I. Podibka ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МІЦНОСТІ МЕБЛЕВИХ ЩИТІВ ІЗ СКЛЕЄНИХ РЕЙОК ДЕРЕВИНИ БУКА // <i>Construction of the mathematical model of the strength of furniture panels made of glaminated beech laws</i>	65
	76
А.О. Луценко // A.O. Lutsenko ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО СИМБІОЗУ ПРОГРАМИ ІМОС З ГНУЧКИМИ АВТОМАТИЗОВАНИМИ МЕБЛЕВИМИ ВИРОБНИЦТВАМИ // <i>Ensuring effective symbiosis of the Imos program with flexible automated furniture production</i>	77
	93
М.М. Копанський, Р.О. Козак, І.І. Кусняк // M.M. Kopansky, R.O. Kozak, I.I Kusniak ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕРЕВИННИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ СТЕБЕЛ РІПАКУ ТА МІНЕРАЛЬНОГО В'ЯЖУЧОГО // <i>Characteristics of wood composites based on rope stem and mineral binder</i>	94
	102
В.В. Киянка, С.В. Гайда // V.V. Kyuanka, S.V. Gayda ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІКИ УТВОРЕННЯ ДЕРЕВИННИХ ЗАЛИШКІВ ТА ВІДХОДІВ ВИРОБНИЧОЇ ДІЯЛЬНОСТІ НА ТЗОВ «ФОРТУНА-МЕБЛІ» // <i>Determination of the dynamics of the formation of wood residues and waste from production activities at LLC «Fortuna-mebli»</i>	103

АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЕРЕВИНО-ЗАГОТОВЧОЇ ГАЛУЗІ В КОНТЕКСТІ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ

Проаналізовано загальну структуру лісопромислового комплекс України та один з основних його компонентів – деревозаготовчу галузь. Обґрунтовано проблеми лісопромислового комплексу в контексті циркулярної економіки. Описано динаміку площі лісового фонду України, яка за даними Державного агентства лісових ресурсів України у 2023 р. становить 10400 тис. га. Проаналізовано динаміку зміни запасів деревини в лісах України за тридцятип'ятирічний період, яка станом 2023 р. становить 2119 млн.м³. Наведено динаміку площі відтворення лісів в Україні, яка станом 2023 р. становить 41208 га. Детально проаналізовано динаміку заготівлі деревини в Україні за восьмирічний період з 2015 по 2023 рр. з індексами зростання та спадання: 2015/2016 – 103,14%; 2016/2017 – 96,95%; 2017/2018 – 102,77%; 2018/2019 – 92,63%; 2019/2020 – 85,42%; 2020/2021 – 99,01%; 2021/2022 – 90,28%; 2022/2023 – 93,11%. Наведено динаміку заготівлі за деревними породами в Україні, аналіз якої засвідчує, що лісоматеріали хвойних порід складають 55,7-67,5%, а твердолистяних порід значно менше – в діапазоні 24,9-32,0% від усієї заготовленої деревини, яка у 2023 р. становила в обсязі 14836,7 тис.м³. Розроблено шляхи щодо розв'язання проблем деревозаготовчої 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. Запропоновано, в цілому, шляхи вирішення проблем лісопромислового комплексу, які включають: створення замкнутого циклу використання ресурсів; розвиток технологій переробки, впровадження енергоефективних технологій виробництва та переробки деревини; продовження здійснення лісокористування в рамках сталого розвитку; стимулювання використання вторинної сировини; впровадження циркулярних бізнес-моделей; співпраця зі стейкхолдерами.

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

Вступ. Лісопромисловий комплекс (ЛПК) України є важливою складовою національної економіки та має досить складну структуру з такими секторами:

1. Сектор затотовляння деревини (лісозаготівлі, лісокористування), що включає діяльність з видобутку деревини з лісів, зокрема деревоспилювальні роботи та транспортувальні послуги з логістики деревини.

2. Сектор лісовпорядкування, що включає в себе лісовпорядкувальні роботи, контроль за дотриманням лісового законодавства, лісозахисні заходи тощо.

3. Сектор деревообробки, що займається переробкою первинної та вживаної деревини [12, 31, 41, 47, 49, 51, 52, 53] на конструкційні матеріали: ДСП [8], стелярні плити [9, 39, 40, 42], меблеві щити [8-11, 13, 16, 20, 35], фасади [18, 38, 44].

4. Сектор експорту та імпорту лісових продуктів: деревини, паперу, целюлози та інших лісових матеріалів [6, 22].

¹ Гайда Сергій Володимирович – член-кореспондент 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

Ці сектори взаємодіють між собою, утворюючи цілісну систему лісопромислового комплексу України. Виходячи із структури, основними компонентами лісопромислового комплексу України є:

- Лісові ресурси: природні ліси, насаджені ліси, резервати та інші землі, які придатні для лісорубної та лісовідновлювальної діяльності.
- Лісові та деревообробні підприємства, які займаються лісокористуванням, лісовпорядкуванням, деревообробкою.
- Науково-дослідні установи, що займаються науковими дослідженнями у галузі лісного господарства, розробкою нових методів лісокористування та сучасних технологій перероблення деревини для забезпечення сталого та ефективного розвитку лісопромислового комплексу України [12, 23, 24, 32].

Маючи розгалужену структуру та значний потенціал, основні компоненти лісопромислового комплексу України стикається з численними проблемами, які потребують уваги, дослідження, аналізу та розв'язання.

Мета дослідження – оцінити стан, обґрунтувати проблеми та розробити шляхи розвитку лісопромислового комплексу (ЛПК) в контексті циркулярної економіки, аналізуючи тенденції затотовляння деревини в цілому та за породами, а також динаміку показників стосовно площі відтворення лісів.

Аналіз проблем основних компонентів ЛПК в контексті циркулярної економіки. 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 [1-4, 21, 43, 46, 48, 50]. А також недостатня охорона лісів від пожеж, шкідників та хвороб; недофінансування, корупція та відсутність адекватного управління, що, в кінцевому результаті, можуть призвести до непродуктивного використання лісових ресурсів, що недопустимо з позицій циркулярної економіки [1, 2, 46].

В контексті циркулярної економіки проблеми лісопромислового комплексу можна описати наступним чином, роблячи акценти на таких моментах:

- Втрата ресурсів: Традиційний лісозаготівельний процес може призводити до неоексплуатації або неправильного використання деревини, що призводить до втрати ресурсів.
- Відходи виробництва: Велика частина лісових ресурсів може бути втрачена через відходи виробництва, такі як тирса, обрізки та інші відходи, які не використовуються повторно або не перероблюються [29].
- Забруднення середовища: Традиційні методи обробки деревини можуть призводити до забруднення повітря, ґрунту та водоймищ, що має негативний вплив на екосистему та здоров'я людей.
- Недоцільна лісозаготівля може призвести до втрати біорізноманіття та знищення природних середовищ для різних видів.
- Виробництво та переробка деревини можуть бути енергоефективними, що веде до великих витрат енергії та викидів парникових газів.
- Нестабільність ринку: Залежність від певних видів деревини та ринкових умов може призвести до нестабільності у лісовому секторі.

Розв'язання цих проблем в контексті циркулярної економіки передбачає розробку та впровадження нових технологій та методів, що сприяють максимально-

му використанню ресурсів, включаючи використання вторинної сировини, відновлювані енергійні джерела, зменшення відходів та забруднення, а також розвиток сталого лісового господарства.

Деревинозаготовча галузь, як компонент ЛПК, стикається з рядом проблем, які включають екологічні, економічні та соціальні аспекти, зокрема:

1. Однією з найбільших проблем є дефорестація, тобто неповернення лісового покриву після вирубки. Це призводить до втрати біорізноманіття, зменшення якості ґрунту та водних ресурсів, а також загрози місцевим екосистемам.

2. Нелегальна рубка лісів є серйозною проблемою в багатьох країнах. Це призводить до втрати природних ресурсів, порушення прав місцевих спільнот та загрози екологічній стійкості лісів. Деякі методи затотовляння деревини, такі як масова вирубка або використання важких машин, можуть призводити до значного пошкодження екосистем, включаючи ґрунтові ерозії та втрату біорізноманіття.

3. Лісозаготівельна діяльність може мати великий вплив на місцеві спільноти, зокрема через втрату земель та житлових територій, порушення традиційних способів життя та конфлікти з місцевими жителями.

4. Важливо забезпечити ефективне відновлення лісових ресурсів після вирубки та розвиток сталого управління лісами, щоб забезпечити їх тривалий розвиток.

5. Зміни клімату можуть впливати на рост та здоров'я лісів, що може вимагати адаптації в методах затотовляння деревини та управління лісовими ресурсами.

Розв'язання цих проблем вимагає комплексного підходу, що включає у себе ефективне законодавство та його виконання, залучення місцевих спільнот та зацікавлених сторін у прийнятті рішень, а також розвиток технологій та практик, спрямованих на сталий розвиток деревинозаготовчої галузі.

Деревообробна галузь, як компонент ЛПК, також стикається з різноманітними проблемами, які охоплюють економічні, екологічні та соціальні аспекти, що пов'язані з наступними викликами:

1. Дефорестація та управління лісовими ресурсами: Постійний тиск на деревинні ресурси призводить до дефорестації та виснаження лісів. Недоцільне управління лісовими ресурсами може призвести до втрати біорізноманіття, зниження якості ґрунту та водних ресурсів, а також до загрози для екосистем.

2. Використання хімікатів та токсичних речовин: Деякі процеси деревообробки, такі як хімічна обробка деревини та захист від шкідників, можуть призводити до викидів токсичних речовин у довкілля та загрози здоров'ю людини.

3. Деревообробна галузь генерує велику кількість відходів, таких як тирса, обрізки та некондиційні залишки. Ефективне управління цими відходами та їх вторинна переробка можуть бути складними завданнями, але і, з іншого боку, здатні вирішувати питання додаткової сировини для виготовлення різних конструкційних матеріалів із прогнозованими властивостями [10, 11, 14, 17, 26-28, 45].

4. Багато процесів деревообробки можуть бути багатоопераційними. Але використання залишків деревини та вживаної деревини в технологічних процесах може зменшити залежність підприємства від первинної деревини [32, 6, 12, 15, 25, 30, 33, 34, 36-38]. Розв'язання цих проблем вимагає комплексного підходу, що включає у себе ефективне управління лісовими ресурсами, використання екологічно чистих технологій та матеріалів, впровадження стратегій циркулярної економіки [1-4, 21, 43, 46, 48] та співпрацю з зацікавленими сторонами.

Якщо розглядати **проблеми деревообробної галузі в контексті циркулярної економіки**, то вона має потенціал для вирішення багатьох з них, зокрема:

1. Відходи та вторинна переробка: Деревообробна промисловість виробляє значну кількість відходів, таких як тирса, обрізки та непридатна для використання деревина. Ефективне використання цих відходів через вторинну переробку або виробництво біопалива може допомогти зменшити негативний екологічний вплив та збільшити ефективність використання ресурсів.

2. Забруднення середовища: Деякі процеси в деревообробній промисловості, такі як хімічна обробка та обробка деревини, можуть призводити до забруднення повітря, води та ґрунту. Виробники повинні шукати більш екологічно чисті технології та процеси для зменшення цього впливу.

3. Дефорестація та вирубка лісів: Попит на деревину може спричиняти незаконну вирубку лісів та дефорестацію. Збалансоване управління лісовими ресурсами та використання відновлюваних джерел деревини може допомогти зменшити негативний вплив на лісовий фонд.

4. Енергоефективність та збереження ресурсів: Багато процесів в деревообробній промисловості можуть бути складними. Вдосконалення технологій та процесів для зменшення споживання енергії та збереження ресурсів може покращити конкурентоспроможність галузі та знизити її вплив на довкілля.

5. Соціальні аспекти: Важливо також враховувати соціальні аспекти деревообробної галузі, такі як умови праці та відносини зі співробітниками. Галузь повинна дбати про дотримання норм соціального стандарту, включаючи безпеку та здоров'я працівників, а також їхні права та добробут.

Аналіз динаміки показників деревиназаготовчої галузі. За даними Державного агентства лісових ресурсів України на 2023 рік, загальна площа лісового фонду країни становила 10400 тис. 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%; 2016/2023 – 107,24%.

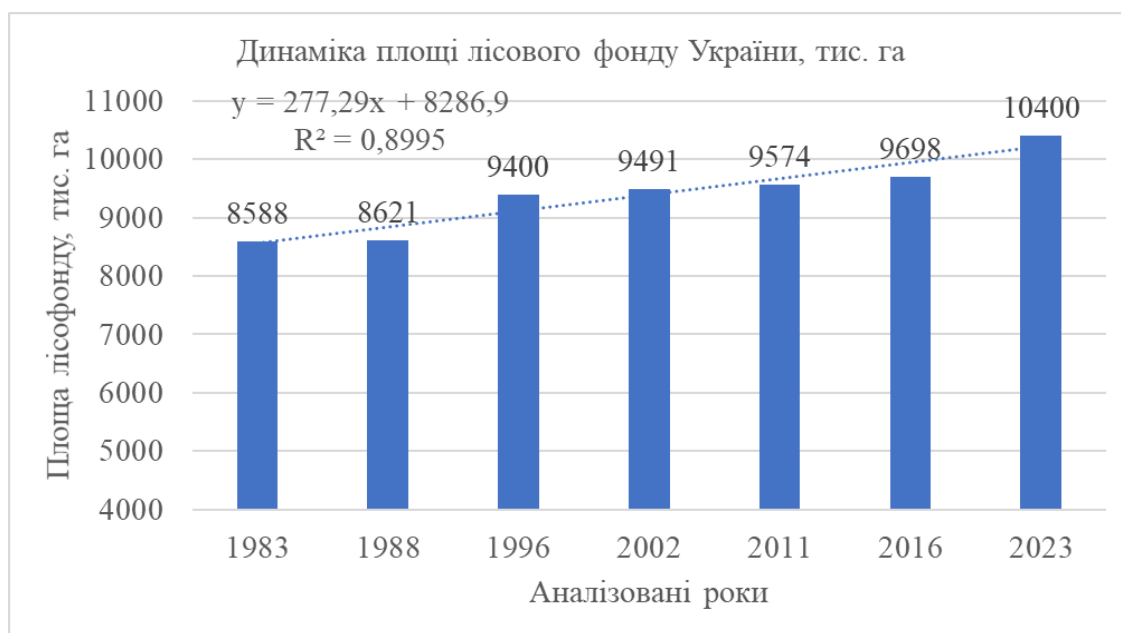


Рис. 1. Динаміка площі лісового фонду України в тис.га за сорокарічний період з 1983 по 2023 рр.

Динаміка **зміни запасів деревини в лісах України** між аналізованими роками (рис. 2) наступна : 1988/1996 – 131,52 %; 1996/2002 – 109,45%; 2002/2014 – 110,47%; 2014/2023 – 100,95%.

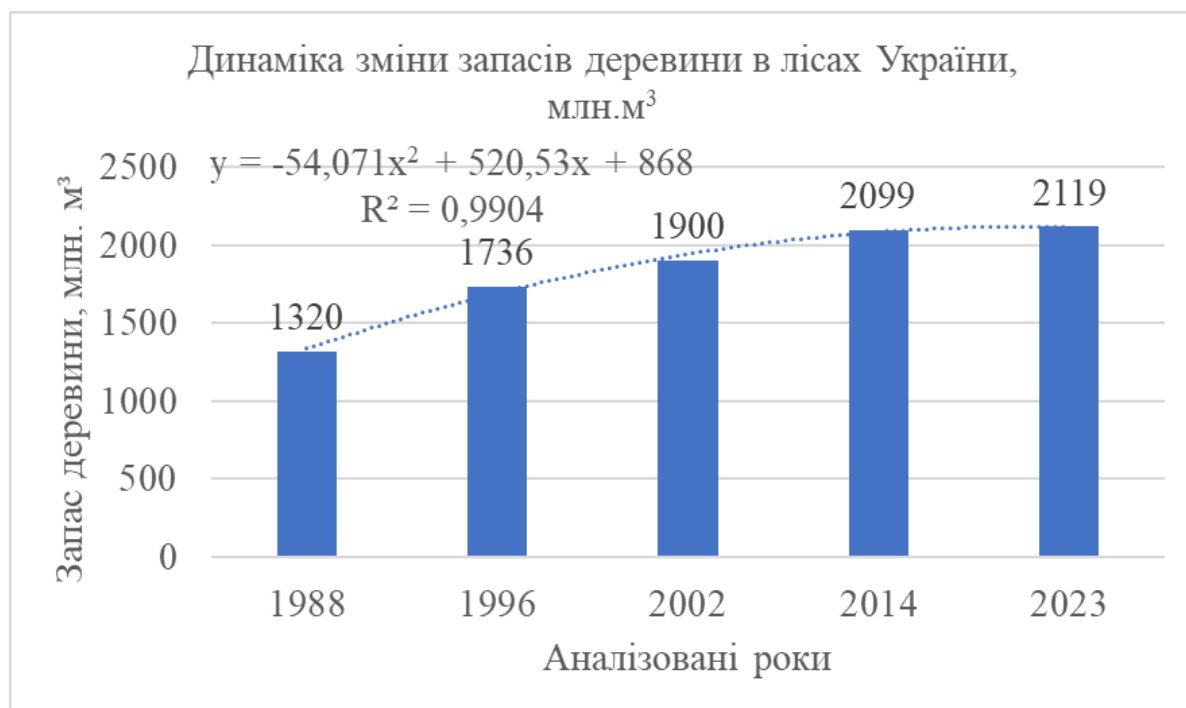


Рис. 2. Динаміка зміни запасів деревини в лісах України, млн.м³ за тридцяти п'ятирічний період з 1988 по 2023 рр.

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. 3) наступна : 2015/2016 – 104,68%; 2016/2017 – 102,34%; 2017/2018 – 79,61%; 2018/2019 – 94,79%; 2019/2020 – 91,73%; 2020/2021 – 110,17%; 2021/2022 – 74,67%; 2022/2023 – 111,82%;.



Рис. 3. Динаміка площі відтворення лісів в Україні, га за восьмирічний період з 2015 по 2023 рр.

Аналіз динаміки показників затотовляння деревини в контексті циркулярної економіки вимагає вивчення декількох ключових аспектів, зокрема сталості затотовляння деревини ліквідної деревини та перероблення залишків деревини від усіх процесів. Звісно, основним завданням лісового господарства є забезпечення сталого розвитку лісової галузі, що передбачає збалансовану лісозаготівлю та раціональне використання лісових ресурсів, збереження їх екологічного та економічного потенціалу. Динаміка **заготівлі деревини в Україні, тис. м³** між аналізованими роками (рис. 4) наступна : 2015/2016 – 103,14%; 2016/2017 – 96,95%; 2017/2018 – 102,77%; 2018/2019 – 92,63%; 2019/2020 – 85,42%; 2020/2021 – 99,01%; 2021/2022 – 90,28%; 2022/2023 – 93,11%.

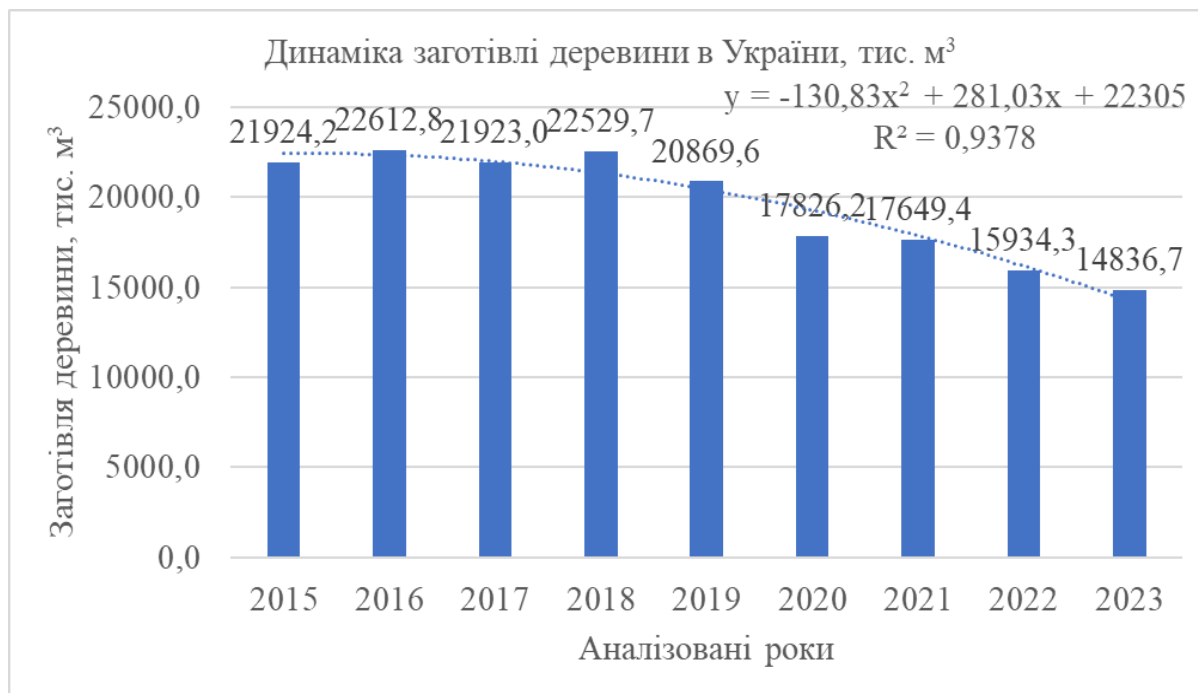


Рис. 4. Динаміка заготівлі деревини в Україні, тис. м³ за восьмирічний період з 2015 по 2023 рр.

Лісові ресурси є основою для розвитку лісозаготівельного комплексу. Заготівля деревини за деревними породами подана на рис. 5. Динаміка **заготівлі деревини за хвойними породами в Україні, тис. м³** між аналізованими роками наступна : 2015/2016 – 105,29%; 2016/2017 – 95,29%; 2017/2018 – 106,18%; 2018/2019 – 90,16%; 2019/2020 – 84,48%; 2020/2021 – 93,52%; 2021/2022 – 81,99%; 2022/2023 – 102,97%. Динаміка **заготівлі деревини за твердолистяними породами в Україні, тис. м³** між аналізованими роками наступна : 2015/2016 – 99,04%; 2016/2017 – 99,07%; 2017/2018 – 98,32%; 2018/2019 – 100,01%; 2019/2020 – 81,16%; 2020/2021 – 105,86%; 2021/2022 – 105,85%; 2022/2023 – 91,21%.

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.

Реалізація ефективної державної політики в лісозаготівельній галузі вимагає урахування природних та господарських аспектів для збалансованого розвитку лісового господарства в Україні. Важливо аналізувати, як ведеться вибіркова виру-

бка дерев, оновлення насаджень та обережне поводження з лісами для мінімізації впливу на природне середовище. В рамках циркулярної економіки, важливо враховувати, як залишки та відходи затотовляння деревини (такі як тирса, тріска, гілки, та тонкомір) переробляються та використовуються, зокрема для виробництва конструкційних щитових матеріалів.



Рис. 5. Динаміка заготівлі за деревними породами в Україні, тис. м³ за восьмирічний період з 2015 по 2023 рр.

Обговорення та розроблення шляхів вирішення проблем лісопромислового комплексу на основі використання принципів циркулярної економіки. Вирішення проблем лісопромислового комплексу на основі принципів циркулярної економіки може включати такі шляхи:

1. Створення замкнутого циклу використання ресурсів, тобто виробництво деревини та її переробка повинні бути спроектовані таким чином, щоб максимально використовувати ресурси та уникати втрат. Наприклад, опилки та обрізки можуть бути використані для виробництва біопалива або дерев'яних плит, а також в інших сферах промисловості.

2. Використання передових технологій переробки, які дозволяють максимально використовувати деревину та її відходи, наприклад, шляхом виробництва високоякісних біопалив, біополімерів або інших продуктів.

3. Впровадження енергоефективних технологій виробництва та переробки деревини для зменшення витрат енергії та викидів парникових газів.

4. Розвиток сталого лісового господарства: Продовження здійснення лісокористування в рамках сталого розвитку, що передбачає збереження та відновлення лісових ресурсів, захист біорізноманіття та участь місцевих спільнот.

5. Підтримка та стимулювання ринку вторинної сировини, наприклад, через фінансові стимули для підприємств, які використовують відходи деревообробної промисловості для виробництва нових продуктів.

6. Впровадження циркулярних бізнес-моделей: Розвиток бізнес-моделей, спрямованих на максимальне використання ресурсів та уникнення втрат, наприклад, системи відновлення та переробки використаних продуктів і відходів.

7. Залучення до процесу розв'язання проблем лісопромислового комплексу всіх зацікавлених сторін, включаючи урядові органи, місцеві спільноти, бізнес, для спільної розробки та впровадження ефективних рішень.

Розроблення шляхів вирішення проблем у деревозаготівчій галузі може включати кілька ключових аспектів:

- **Сталість лісокористування:** Важливо забезпечити стабільність у використанні лісових ресурсів, щоб уникнути перевищення природної відновлюваності лісів. Це може включати раціоналізацію системи лісовпорядкування та впровадження моніторингу за вирубками.

- **Екологічна усталеність:** Використання сучасних технологій у лісорозробці та виробництві для зменшення впливу на природу. Це включає використання менш інвазивних методів вирубки, рециклінг деревини та мінімізацію викидів.

- **Соціальна відповідальність:** Залучення місцевого населення до процесів лісокористування, забезпечення справедливих умов праці для працівників у цій галузі та розвиток місцевих спільнот.

- **Інноваційність:** Застосування новітніх технологій у керуванні лісовими ресурсами, таких як супутникові та дронів технології для моніторингу лісів, аналізу даних про землі та використання даних для управління лісом.

- **Міжнародне співробітництво:** Співпраця з іншими країнами для обміну найкращими практиками у сфері лісового господарства та вирішення спільних екологічних проблем.

- **Законодавче регулювання:** Впровадження ефективної системи законодавчого регулювання для захисту лісових ресурсів та забезпечення сталого використання деревини.

Ці напрями спрямовані на створення більш стійкої та ефективної деревозаготівчої галузі, яка забезпечує потреби сучасного суспільства, не посягаючи при цьому на екологічну рівновагу та соціальні аспекти.

Висновки

1. Проаналізовано загальну структуру лісопромислового комплекс України та один з основних його компонентів – деревозаготівчу галузь.

2. 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 та відходи в асортименті у процесах перероблення, забруднення середовища, недоцільна лісозаготівля, що може призвести до втрати біорізноманіття, нестабільність ринку.

3. Описано динаміку площі лісового фонду України в тис.га за сорокарічний період з 1983 по 2023 рр., яка за даними Державного агентства лісових ресурсів України становить 10400 тис. га.

4. Проаналізовано динаміку зміни запасів деревини в лісах України, млн.м³ за тридцяти п'ятирічний період з 1988 по 2023 рр., яка станом 2023 р. становить 2119 млн.м³.

5. Наведено динаміку площі відтворення лісів в Україні, га за восьмирічний період з 2015 по 2023 рр. яка станом 2023 р. становить 41208 га.

6. Детально проаналізовано динаміку заготівлі деревини в Україні за восьмирічний період з 2015 по 2023 рр. з індексами зростання та спадання : 2015/2016 – 103,14%; 2016/2017 – 96,95%; 2017/2018 – 102,77%; 2018/2019 – 92,63%; 2019/2020 – 85,42%; 2020/2021 – 99,01%; 2021/2022 – 90,28%; 2022/2023 – 93,11%.

7. Наведено динаміку заготівлі за деревними породами в Україні, аналіз якої засвідчує, що лісоматеріали хвойних порід складають 55,7-67,5%, а твердолистяних порід значно менше – в діапазоні 24,9-32,0% від усієї заготовленої деревини, яка у 2023 р. становила в обсязі 14836,7 тис.м³.

8. Зазначено, що при деревинозаготівлі у 2023 р., як найнижчого показника за аналізований період, аналіз динаміки показників затотовляння деревини в контексті циркулярної економіки вимагав вивчення декількох ключових аспектів, зокрема сталості затотовляння ліквідної деревини та перероблення деревинних залишків від усіх процесів у майбутньому на конструкційні матеріали.

9. Розроблено 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 джерела енергії, зменшення залишків, а також розвиток сталого лісового господарства.

10. Запропоновано, в цілому, шляхи вирішення проблем лісопромислового комплексу, які включають: створення замкнутого циклу використання ресурсів; розвиток технологій переробки, впровадження енергоефективних технологій виробництва та переробки деревини; продовження здійснення лісокористування в рамках сталого розвитку; стимулювання використання вторинної сировини; впровадження циркулярних бізнес-моделей; співпраця зі стейкхолдерами.

References

1. **Bezama A.** (2016). Let us discuss how cascading can help implement the circular economy and the bio-economy strategies. *Waste Manag. Res.*, 34, pp. 593-594, <https://doi.org/10.1177/0734242X16657973>.
2. **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>.
3. **Circular economy** industry platform. <http://www.circularchy.eu/project/renault-closed-loop/>
4. **Circularity Gap Report** (2022). five years of analysis by Circle Economy https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/1_report_cgr_global_2022
5. **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>
6. **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).
7. **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. doi: <https://doi.org/10.36930/42144010>
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 of forest complex* 38:212-216 (in Russian).

9. **Gayda S.V.** (2015). Modeling properties of blockboards made of post-consumer wood on the basis of the finite element method. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 41, 39-49. <https://doi.org/10.36930/42154106>
10. **Gayda S.V.** (2000): Матеріали для виготовлення виробів з деревини / Materials for the Production of wood Products. Lviv: BMC. – 160 p. (in Ukr.).
11. **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>
12. **Gayda S.V.** (2016). Технологічні підходи до поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом / *Tekhnolohichni pidkhody do poverkhnevoho ochyshchennya vzhuvanoyi derevyiny holkofrezernym instrumentom* [Technological approaches to cleaning of surface of post-consumer wood of needle-milling tools]. *Bulletin of KhNTUA* 178:3-11 (in Ukrainian).
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 (in Russian).
14. **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>
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. <https://doi.org/10.36930/42174301> (in Ukrainian).
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.** (2018). Технологія МДФ-фасадів / *Tekhnolohiyi MDF-Fasadiv* [MDF Facade Technologies]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 44:70-83 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184410>
19. **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).
20. **Gayda S.V.** (2020). Analysis of structures and technologies of manufacture of modern furniture facades. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 54-64. <https://doi.org/10.36930/42204606> (in Ukrainian).
21. **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>
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., Kiyko O.A.** (2013). Технология очистки вторично используемой древесины иглофрезерными станками [The technology of cleaning recycled wood with needle milling machines] // *Actual problems and prospects of the development of LPK: materials II NTK.*, September 9-11, 2013 – Kостroma. – P. 36-39.
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). Властивості вживаної деревини як визначальний чинник якості меблевих виробів / *Vlastyvosti vzhuvanoyi derevyiny yak vyznachal'nyy chynnyk yakosti meblevykh vyrobiv* [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). <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., Maksymiv V.M.** From recycled post-consumer wood towards prime quality particleboard / Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть // міжвід. наук.-техн. зб. – Львів: НЛТУ України. – 2010, вип. 36. – С. 57-77.
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.** (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.
33. **Gayda S.V., Petryshak I.V.** (2020). Study of the influence of breed and grinding modes on the specific productivity of grinding skin. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 46:5-15 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42204601>.
34. **Gayda S.V., Petryshak I.V., Humeniuk Zh.Ya.** (2021). Determination of the influence of rock and grinding modes on the surface roughness of wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 47:5-15 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214701>.
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 (in Ukrainian).
36. **Gayda S.V., Voytovych I.G., Orikhovskyy R.Ya.** (2020). Дослідження технологічних процесів виготовлення ніжок столів обідніх різних конструкцій / *Doslidzhennya tekhnolohichnykh protsesiv vyhotovlennya nizhok stoliv obidnikh riznykh konstruktsiy* [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. **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. **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>
40. **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>
41. **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>
42. **Gayda S.V.** (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.
43. **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>.
44. **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, (in Russian).
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, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42194521>

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. **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).
51. **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. doi: <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00281-w>.
52. **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>.
53. **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>.

UDC 674.001

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

Analysis of the trend of the main indicators of the wood processing industry in the context of the circular economy

The general structure of the forest industry complex of Ukraine and one of its main components – the wood harvesting industry – have been analyzed. The problems of the forest industry-word complex in the context of the circular economy are substantiated. The dynamics of the area of the forest fund of Ukraine is described, which according to the State Agency of Forest Resources of Ukraine in 2023 is 10,400 thousand ha. The dynamics of changes in wood reserves in the forests of Ukraine over a thirty-five-year period were analyzed, which as of 2023 is 2119 million m³. The dynamics of the area of forest reproduction in Ukraine, which as of 2023 is 41,208 hectares, is given. The dynamics of wood harvesting in Ukraine, thousand m³ for the eight-year period from 2015 to 2023, with growth and decline indices: 2015/2016 – 103.14%; 2016/2017 – 96.95%; 2017/2018 – 102.77%; 2018/2019 – 92.63%; 2019/2020 – 85.42%; 2020/2021 – 99.01%; 2021/2022 – 90.28%; 2022/2023 – 93.11%. The dynamics of harvesting by wood species in Ukraine, thousand m³, is given, the analysis of which shows that coniferous timber makes up 55.7-67.5%, and hardwoods are much less – in the range of 24.9-32.0% of of all harvested wood, which in 2023 amounted to 14,836.7 thousand m³. Ways to solve the problems of the timber industry in the context of the circular economy have been developed, which involves the development and implementation of new technologies and methods that contribute to the maximum use of resources, including the use of secondary raw materials, renewable energy sources, reduction of waste and pollution, as well as the development of sustainable forest management. In general, ways to solve the problems of the forest industry complex are proposed, which include: creating a closed cycle of resource use; development of processing technologies, introduction of energy-efficient technologies for wood production and processing; continuation of forest use within the framework of sustainable development; stimulation of the use of secondary raw materials; implementation of circular business models; cooperation with stakeholders.

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

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МІЦНОСТІ ЗРОЩЕНИХ ЗАГОТОВОК ІЗ ВЖИВАНОЇ ДЕРЕВИНИ ЯЛИЦІ

Обґрунтовано доцільність використання розмірно-придатних брусків елементів вживаної деревини для отримання зрощених заготовок для виготовлення виробів з деревини. Підготовлено зрощені заготовки із вживаної деревини ялиці шляхом реалізації В-плану другого порядку, де змінними були ширина розмірно-придатних брусків та довжина зубчастих шипів в брусках. Визначено експериментальним шляхом межу міцності під час статичного згину для зрощених заготовок із вживаної деревини ялиці та побудовано адекватну математичну (регресійну) модель залежно від ширини розмірно-придатних брусків з ялиці $B(x_1)$ та довжини зубчастих шипів в брусках $D(x_2)$. Визначено, що ширина рейки з ялиці $B(x_1)$ в конструкції зрощених заготовок призводить до суттєвого збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u (від 16,17 до 19,40 %). Натомість, тенденція щодо залежності впливу довжини зубчастих шипів в брусках $D(x_2)$ на збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u є менш суттєвою (від 10,58 до 14,03 %). Виявлено, що збільшення довжини зубчастого шипа від 10 до 20 мм приводить до зростання межі міцності при статичному згині на 5,78 %, а від 10 до 30 мм – на 10,58 %. Встановлено, що отримані межі міцності σ_u для всіх зразків експериментальних зразків зрощених заготовок із вживаної деревини ялиці не залежно від їх конструкції, задовольняють нормативні вимоги для первинної деревини ялиці (84,5 МПа). Встановлено за результатами експериментальних досліджень, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 72,2478$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши розмірні параметри ширини розмірно-придатних брусків з ялиці $B = 56$ мм та довжини зубчастих шипів в брусках $D = 30$ мм. З практичного досвіду рекомендовано використовувати вживану деревину для виробництва зрощених заготовок з перерізом розмірно-придатних брусків у відношенні товщина-ширина не більшим 1:3 з довжиною зубчастого шипа для заготовок ґратчастих меблів – 30 мм, а для меблевого щита та столярної плити – 10 мм.

Ключові слова: вживана деревина, зрощені заготовки, математична модель, технологія, міцність, склеювання, перероблення, ялиця біла (*Abies alba* Mill), циркулярна економіка.

Вступ. Потенційним ресурсом і невикористаною базою деревної сировини, запаси якої збільшуються в міру розвитку промисловості і господарства країни в цілому є запаси деревинних відходів (залишків) та вживаної деревини у вигляді брусків елементів [9-13, 35, 36, 37, 49, 50, 55, 57]. Залучення відповідної кількості короткомірних брусків шляхом зрощування у виробничий процес стане додатковим резервом деревинних сировинних ресурсів. Комплексне використання деревинних ресурсів є актуальною проблемою сьогодення, бо сприяє економії первинної деревини та, відповідно, зменшенні викидів вуглекислого газу та навантаження на довкілля. Проблема – відсутність нормативних документів, що визна-

¹ Лесів Лев Едуардович – аспірант кафедри технології меблів і виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-258-31-75, +38-097-127-42-26. E-mail: levlesiv123@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3959-5447>

² Гайда Сергій Володимирович – член-кореспондент Лісівничої академії наук України, д-р техн. наук, професор, кафедра 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

³ Салапак Любов Василівна – старший викладач, кафедра прикладної механіки і технології матеріалів. Тел.: +38-098-432-16-06. E-mail: lyubov.salapak@nltu.edu.ua

чають фізико-механічні властивості зубчастих з'єднань за різною довжиною шипа при різній ширині брусків підготовлених із вживаної деревини, зокрема.

Загальна мета – порівняльний аналіз міцності шипових з'єднань, одержаних на зубчастий шип різної довжини при різній ширині брусків, що характерно як для виготовлення елементів ґратчастих меблевих виробів так і при виготовленні щитових конструкцій меблевих щитів та столярних плит різної якості та асортименту. Конкретна мета дослідження – експериментально виготовити зрощені заготовки із вживаної деревини (ЗЗ із ВЖД), що мають різну довжину шипа при різній ширині брусків, перевірити їх на міцність на статичний згин впоперек рейок та провести порівняльний аналіз фізико-механічних параметрів монолітних та зрощених елементів. Об'єкт дослідження – шипові з'єднання в зрощених брусках, що використовуються у виробництві виробів з деревини. Предмет дослідження – порівняльний аналіз механічних властивостей зрощених брусків елементів, що зроблені на різні типорозміри зубчастого шипа при різній ширині брусків.

Суть роботи:

- дослідити можливість залучення короткомірних відрізків для зрощування, як конструктивних елементів для виробів з деревини;
- дослідити та порівняти міцнісні характеристики брусків елементів, що зроблені на різні типорозміри зубчастого шипа при різній ширині брусків.
- вивчити питання міцності з'єднань, зокрема зубчастих, як найменш досліджених у порівнянні з шиповими;
- обґрунтувати доцільність використання певних типорозмірів зубчастих з'єднань для конкретних складових елементів майбутнього виробу.

Очікувані результати. Маючи певні напрацювання з даної проблеми досліджень та, після проведення експериментів, розробити практичні рекомендації стосовно матеріального використання короткомірних брусків з деревообробної та меблевої галузі та розмірно-придатних із підготовленої вживаної деревини.

Дослідження і аналіз комплексного використання деревинних ресурсів є актуальним завданням, рішення якого забезпечить виготовлення якісних виробів з деревини з максимальним урахуванням особливостей фізико-механічних властивостей матеріалів додаткового використання, зокрема вживаної деревини.

Аналіз джерел літератури. Аналіз джерел літератури стосовно актуальності використання вживаної деревини стосується екологічних, економічних, технічних, і соціальних аспектів, що полягають у наступному:

- Збереженні природних лісів та біорізноманіття [10, 49, 50, 55, 57].
- Економії енергії під час перероблення вживаної деревини, ніж під час оброблення первинної деревини, знижуючи вуглецеві викиди.
- Уникнення потрапляння ВЖД на сміттєзвалища, зменшуючи навантаження на екосистему.
- Собівартість ВЖД значно нижча, ніж нова, особливо якщо вона суха та вже якісно оброблена [29, 36, 37, 49, 50, 51, 55, 56].
- Використання вживаної деревини може підтримувати місцеві бізнеси, що займаються рециклінгом та переробкою матеріалів [31, 33, 46].
- Вживана деревина може мати унікальні властивості та естетику, яка відсутня у нових матеріалів.

Аналіз джерел літератури щодо проблемності використання вживаної деревини базуються на тому, що:

- Вживана деревина може містити залишки фарб, лаків, консервантів або інших хімічних речовин, які можуть бути шкідливими для здоров'я або навколишнього середовища [49, 50].
- Обробка або переробка старої деревини може призводити до викидів в атмосферу шкідливих речовин.
- Очищення, обробка та підготовка вживаної деревини до повторного використання можуть вимагати значних витрат, а також залучення робототехніки для операцій сканування та сортування [2, 5, 6, 10].
- Фізичні та механічні властивості деревини можуть погіршуватися з часом, що ускладнює її повторне використання. Вживана деревина може бути непридатною для деяких застосувань через свою структуру або стан, але придатною як додаток для стружкових плит [17].
- Будівельні кодекси та стандарти можуть обмежувати використання вживаної деревини в певних типах конструкцій або регіонах.

У зв'язку з цим, проблемні виклики потребують додаткових досліджень та інновацій, а також зміни у законодавстві та ринкових практиках для подолання бар'єрів на шляху більш широкого використання вживаної деревини у деревообробній та меблевій галузі.

У контексті циркулярної економіки, вживана деревина виступає як ключовий ресурс для зменшення відходів, ефективного використання матеріалів і зменшення екологічного впливу [1, 26, 29, 51, 54, 56]. Наукові праці тут фокусуються на кількох основних напрямках:

- Аналіз впливу використання вживаної деревини з погляду екологічних та енергетичних показників на всіх етапах життєвого циклу продукту (Life Cycle Assessment, LCA). Ці дослідження допомагають оцінити потенційні екологічні заощадження та визначити оптимальні шляхи зменшення вуглецевого сліду через повторне використання матеріалів.
- Аналіз методів та розроблення технологій, що дозволяють ефективно збирати, обробляти та повторно використовувати вживану деревину.

Аналіз статей науковців з перероблення вживаної деревини для виготовлення виробів з деревини та конструкційних матеріалів зазвичай охоплює дослідження, що включають технічні можливості, екологічні переваги, економічну ефективність та інноваційні підходи:

- Використання механічних, хімічних та біологічних методів для видалення забруднень та обробки матеріалу.
- Розробка ефективних технологій для виготовлення високоякісних виробів з вживаної деревини [12, 16, 17, 19, 32, 40, 42, 43, 44, 45, 47, 52].
- Вивчення фізичних та механічних властивостей переробленої деревини для забезпечення її використання в конструкціях [7, 9, 30, 39, 46].
- Аналіз переваги щодо зменшення потреби у вирубці нових дерев для виробництва конструкційних матеріалів : столярних плит [16, 17, 19, 21, 23-24, 27, 28, 30, 33, 38, 48], меблевих щитів [18, 21, 25, 41, 44, 53].
- Аналіз переваги щодо використання вже існуючих матеріалів допомагає знизити вуглецевий слід виробництва.

- Аналіз мінімізації відходів шляхом використання старих матеріалів.
- Порівняльний аналіз витрат на виготовлення виробів з вживаної деревини порівняно з новими матеріалами.
- Розроблення нових композитних матеріалів, які використовують вживану деревину у поєднанні з іншими матеріалами.

Як показав **аналіз наукових статей щодо зрощування** дерев'яних брускових елементів на зубчастий шип для отримання якісних та міцних заготовок, то тут розглядаються зазвичай такі ключові аспекти:

- Визначення параметрів для забезпечення максимальної міцності з'єднання.
- Вивчення впливу різних клеїв на міцність і тривалість з'єднання.
- Методи підготовки поверхонь для поліпшення адгезії і якості з'єднання.
- Аналіз результатів випробувань на показник міцності при статичному згині.
- Оцінка стійкості з'єднань до впливу зовнішніх чинників, таких як волога, температура та механічні навантаження.
- Дослідження процесів адгезії між дерев'яними елементами та клеєм для забезпечення максимальної міцності з'єднання.
- Розробка математичних моделей для опису процесу зрощування та прогнозування його властивостей [13, 18, 23, 32, 34, 50].

Аналіз наукових праць підтвердив актуальність цих питань, оскільки вирішення буде сприяти розвитку ефективних та сталих методів перероблення ВЖД на високоякісні заготовки та вироби. Але відсутність перевірених показників, в тому числі на міцність при статичному згині для зрощених елементів, вимагають експериментальних досліджень. Тому, безперечно, розроблення практичних рекомендацій є основою для швидкого впровадження ВЖД в технологічні процеси.

Методика досліджень. Загальна методика досліджень включає: заготівлю; очищення та сортування; технологічні операції з виготовлення розмірно-придатних брусків із ВЖД ялиці, зрощених елементів; випробування для визначення показників міцності при статичному згині.

Матеріали для проведення досліджень – це заготовки ВЖД породи ялина, клей ПВА компанії Jowat. Рейки виготовлялись поперечним розміром 22×28, 22×42, 22×56 мм. Після склеювання одержували калібровані зрощені елементи товщиною 20 мм.

Для вирішення поставлених завдань досліджень було використано план другого порядку, який дозволяє отримати математичний опис об'єкта у вигляді поліному другого порядку (квадратична модель).

Для двох змінних факторів кількість дослідів В-плану дорівнює $N=2^2+2 \cdot 2=8$. Оскільки на основі пошукового експерименту визначено, що в кожному досліді було проведено п'ять спостережень, тобто кількість спостережень в експерименті дорівнює $8 \times 5=40$.

У результаті досліджень явища з літературних джерел, практичного досвіду і теоретичного аналізу досліджень було вибрано область експерименту (табл. 1). Змінними факторами для зрощених елементів із ВЖД були ширини брусків 28, 42, 56 мм (В) та довжина зубчастих шипів в брусках 10, 20, 30 мм (D_H).

Вихідним параметром було значення межі міцності при статичному згині зрощених елементів із ВЖД ялиці.

Таблиця 1. Матриця В-плану для двох змінних факторів

№ досліду	Значення вхідних факторів у досліді			
	У натуральному позначенні		У кодованому позначенні	
	B	D	x ₁	x ₂
ПФП 2 ^k	28	10	-1	-1
	56	10	1	-1
	28	30	-1	1
	56	30	1	1
Зіркові точки	28	20	-1	0
	56	20	1	0
	42	10	0	-1
	42	30	0	1

Межу міцності столярної плити під час статичного згину визначали на сертифікованій випробувальній машині.

Результати (Results). Згідно методики досліджень було виготовлено експериментальні зрощені елементи із ВЖД ялиці (рис. 1) для подальшого дослідження та порівняльного аналізу шляхом випробування на межу міцності при статичному згині.

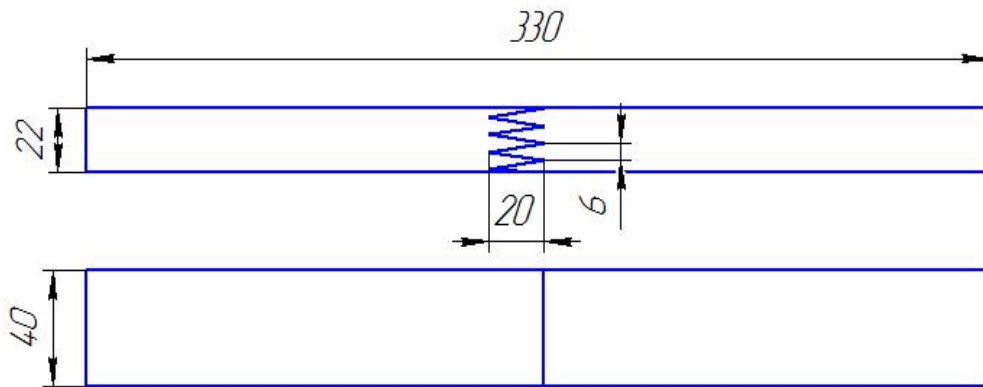


Рис. 1. Конструкція зрощеної заготовки із ВЖД товщиною 22 мм

Результати експериментальних випробувань на впливу ширин брусків та довжини зубчастих з'єднань на показники міцності при статичному згині зрощених елементів із ВЖД ялиці представлено у табл. 2.

Таблиця 2. Розрахунок середніх значень та дисперсії

№	Результати у _{ij} показника міцності при статичному згині конструкцій 33 із ВЖД ялиці, МПа					Середнє значення в j-ій вибірці	Дисперсія в j-ій вибірці
	у _{1j}	у _{1j}	у _{1j}	у _{1j}	у _{1j}		
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	52,125	51,856	52,223	52,023	51,981	52,042	0,0196
2.	62,125	62,224	61,956	61,992	62,234	62,106	0,0165
3.	58,223	58,105	58,118	58,426	58,324	58,239	0,0188
4.	72,325	72,256	72,411	72,199	72,204	72,279	0,0080
5.	55,238	55,401	55,329	55,288	55,196	55,290	0,0063
6.	67,452	67,225	67,288	67,193	67,205	67,273	0,0114
7.	57,899	58,112	57,944	57,875	57,924	57,951	0,0088
8.	66,125	66,129	65,988	65,859	66,009	66,022	0,0125
	Сума					491,200	0,1019

$$\text{Дисперсію відтворюваності: } S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{N}; \quad (1)$$

Підставивши дані у формулу 1 отримаємо значення дисперсії відтворюваності: $S_y^2 = 0,1019/8=0,01273$. Отримані коефіцієнти та їх значимість. Для визначення коефіцієнтів рівняння було використано відомі методики статистичної обробки даних і розраховано коефіцієнти рівняння регресії (табл. 3).

Таблиця 3. Розрахунок коефіцієнтів регресії математичної моделі

Коефіцієнт	Величина коефіцієнта	$t(q, f_y) S\{b_i\}$	Висновок	Межі достовірного інтервалу	
				$b_i - t_{\text{табл}} S\{b_i\}$	$b_i + t_{\text{табл}} S\{b_i\}$
b_0	62,101	0,115	знач.	61,99	62,22
b_1	6,014	0,042	знач.	5,97	6,06
b_2	4,074	0,042	знач.	4,03	4,12
b_{11}	-0,820	0,089	знач.	-0,91	-0,73
b_{22}	-0,115	0,089	знач.	-0,20	-0,03
b_{12}	0,994	0,051	знач.	0,94	1,05

$$\text{Для дисперсії адекватності: } \sum_{j=1}^8 (\bar{y}_j - y_j^p)^2 \quad (2)$$

Таблиця 3. Розрахунок дисперсії адекватності

№ досліду	$\bar{y}_j$	y_j^p	$(\bar{y}_j - y_j^p)^2$
1.	52,04	52,07	0,0009
2.	62,11	62,11	0,0001
3.	58,24	58,23	0,0001
4.	72,28	72,25	0,0009
5.	55,29	55,27	0,0005
6.	67,27	67,30	0,0005
7.	57,95	57,91	0,0014
8.	66,02	66,06	0,0014
Сума			0,0060

$$\text{Визначаємо дисперсію адекватності: } S_{ad}^2 = \frac{n}{f_{ad}} \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - y_j^p)^2 \quad (3)$$

$$S_{ad}^2 = 5/(8-7) \times 0,0060 = 0,03.$$

$$\text{Розрахункове значення критерію Фішера: } F_{\text{розн.}} = \frac{S_{\text{більша}}^2}{S_{\text{менша}}^2} = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \quad (4)$$

Підставивши дані у формулу 4 отримаємо розрахункове значення критерію Фішера $F_{\text{розн.}}$: $F_{\text{розн.}} = 0,03/0,01273=2,341$. Табличне значення критерію Фішера $F_{\text{табл.}}$, яке залежить від рівня значимості $q=5\%$, числа ступенів вільності дисперсії адекватності $f_{ad}=8-7=1$ та числа належних оцінок дисперсії відтворюваності $f_y=8*(5-1)=32$: $F_{\text{табл.}}=252$. Оскільки, $2,341 < 252$ ($F_{\text{розн.}} < F_{\text{табл.}}$), тоді регресійна модель адекватна. За результатами оброблення даних експерименту отримано рівняння регресії другого порядку, яке описує залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від ширини розмірно-придатних брусків з ялиці $B(x_1)$ та довжини зубчастих шипів в брусках $D(x_2)$.

Одержана математична модель – рівняння регресії в нормалізованих значеннях змінних факторів має вигляд:

$$y = 62,101 + 6,014x_1 + 4,074x_2 - 0,82x_1^2 - 0,115x_2^2 + 0,994x_1x_2$$

Запис математичної моделі – рівняння регресії в натуральних значеннях змінних факторів такий:

$$\sigma_u = 4,18 + 0,556 B + 0,146 D - 0,0032 B^2 - 0,00115 D^2 + 0,0071 B D.$$

Отже, ширина розмірно-придатних брусків та довжини зубчастих шипів в брусках в конструкції ЗЗ із ВЖД ялиці суттєво впливає на межу міцності під час статичного згину σ_u . Обидва змінних фактори впливають прямопропорційно. Найбільше на межі міцності під час статичного згину σ_u ЗЗ із ВЖД ялиці впливає перший фактор B (x_1) – ширина розмірно-придатних брусків. Вплив другого фактору довжини зубчастих шипів в брусках D (x_2) на межі міцності під час статичного згину σ_u у порівнянні з першим є в 1,5 ($6,014/4,074$) рази меншим. Графічна інтерпретація залежностей на рис. 2 та рис. 3.

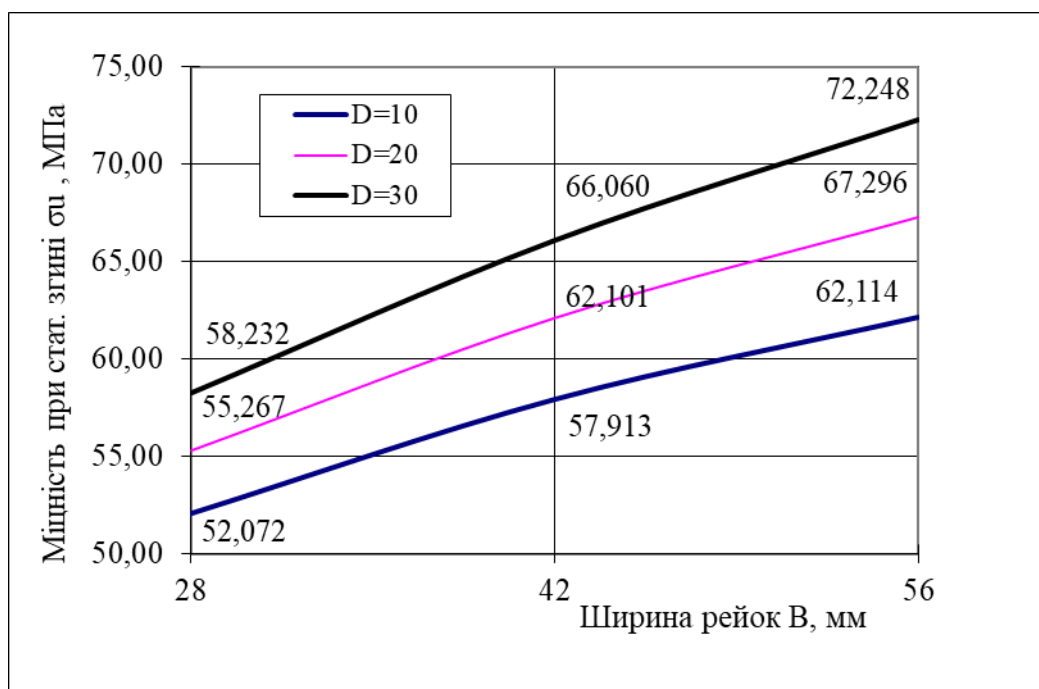


Рис. 3. Залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від ширини брусків з ялиці $B(x_1)$ в конструкції зрощених заготовок з ялиці

Як видно з рис. 2, збільшення ширини рейки з ялиці $B(x_1)$ в конструкції ЗЗ із ВЖД призводить до суттєвого збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u (від 16,17 до 19,40 %). Натомість, тенденція щодо залежності впливу довжини зубчастих шипів в брусках D (x_2) на збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u є менш суттєвою (від 10,58 до 14,03 %). (рис. 3). Отримані межі міцності σ_u для всіх зразків експериментальних зразків, задовольняють нормативні вимоги для первинної деревини ялиці (84,5 МПа).

За результатами експерименту здійснено оптимізацію ширини розмірно-придатних брусків з ялиці $B(x_1)$ та довжини зубчастих шипів в брусках D (x_2) за допомогою градієнтного методу, внаслідок якої виявлено, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 72,2478$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши розмірні параметри ширини розмірно-придатних брусків з ялиці $B(x_1) = 56$ мм та довжини зубчастих шипів в брусках D (x_2) = 30 мм (рис. 4).

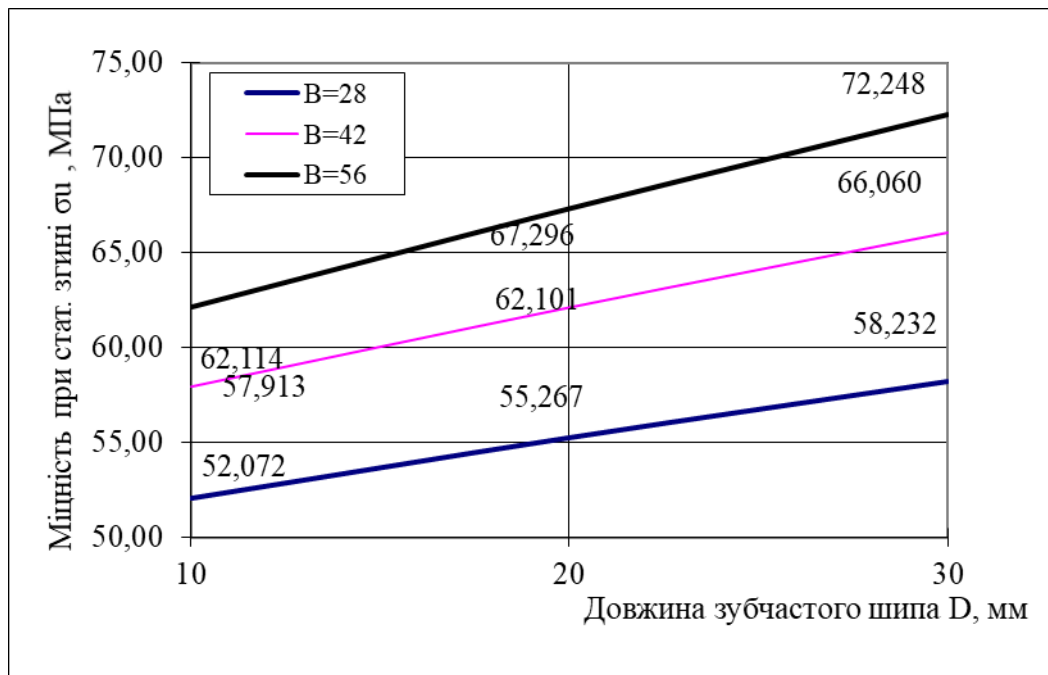


Рис. 3. Залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від довжини зубчастих шипів в брусах D (x_2) в конструкції зрощених заготовок з ялиці

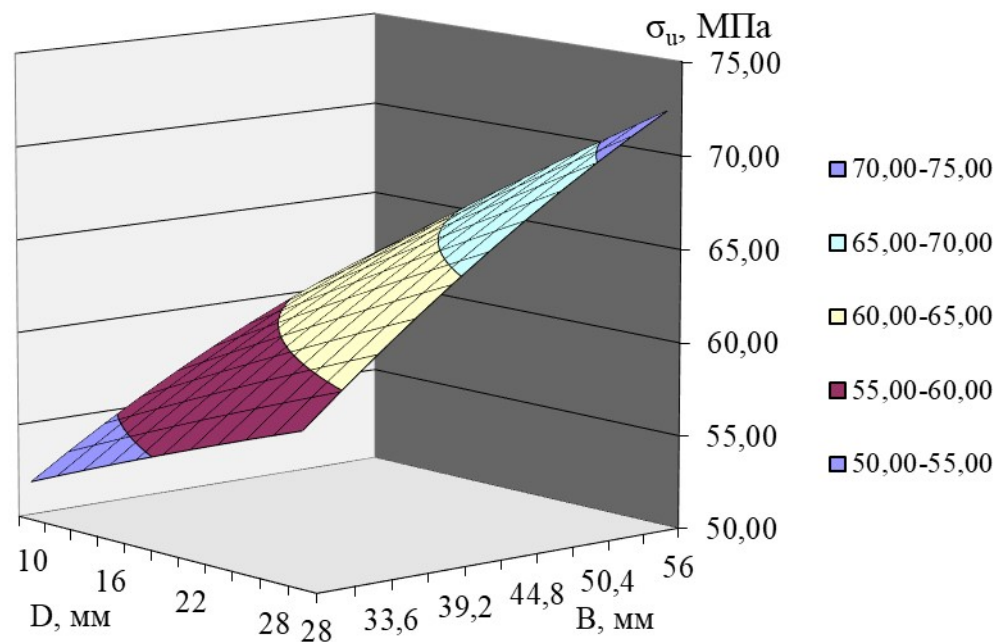


Рис. 4 Графічна залежність $\sigma_u = f(B(x_1), D(x_2))$

Дискусія. Обґрунтовано, що потенційним джерелом деревинної сировини є різні деревинні відходи, зокрема, вживана деревина. Запропоновано використовувати у технологічних процесах деревообробки на підставі системного аналізу очищену ВЖД в масивному вигляді – для виробництва зрощених заготовок.

Визначено експериментальним шляхом межу міцності під час статичного згину для 33 із ВЖД ялиці та побудовано математичну (регресійну) модель залежно від ширини розмірно-придатних брусків з ялиці $B(x_1)$ та довжини зубчастих шипів в брусах D (x_2). Отримана модель є адекватною, а отже може бути використана для опису об'єкта дослідження. Визначено, що ширина рейки з ялиці $B(x_1)$ в конструкції 33 із ВЖД призводить до суттєвого збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u (від 16,17 до 19,40 %). Натомість, тенденція щодо залежності

впливу довжини зубчастих шипів в брусках $D(x_2)$ на збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u є менш суттєвою (від 10,58 до 14,03 %). (рис. 3). Отримані межі міцності σ_u для всіх зразків експериментальних зразків, задовольняють нормативні вимоги для первинної деревини ялиці (84,5 МПа).

Визначено, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 72,2478$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши розмірні параметри ширини розмірно-придатних брусків з ялиці $V(x_1) = 56$ мм та довжини зубчастих шипів в брусках $D(x_2) = 30$ мм. Крім того, одержані результати міцності ЗЗ із ВЖД на статичний згин були порівняні з результатами досліджень, зазначених інших в наукових працях, присвячених використанню вживаної деревини для створення зрощених заготовок. Встановлено, що підбір довжини зубчастого шипа для зрощування брусків є визначальним для забезпечення відповідної міцності. Виявлено, що збільшення довжини шипа від 10 до 20 мм приводить до зростання межі міцності при статичному згині на 5,78 %, а від 10 до 30 мм – на 10,58 %. З практичного досвіду рекомендовано використовувати вживану деревину для виробництва зрощених заготовок з перерізом розмірно-придатних брусків у відношенні не більшим 1:3. Розроблено практичні рекомендації для виробництва ЗЗ із ВЖД: вологість розмірно-придатних брусків – 8 ± 2 %; для розмірно-придатних брусків: ширина становить 2-3 товщини мм; витрата клею для зрощування – 120-150 г/м²; температура вайми для зрощування – 80-90 °С; час витримки під тиском для щита – 12-30 с; тиск для змикання брусків – 0,6-1,8 МПа. У підсумку можна зазначити, що результати досліджень підтверджують доцільність використання вживаної деревини для виготовлення зрощених заготовок, але для отримання високих показників міцності необхідно дотримуватись запропонованих практичних рекомендацій.

Висновки.

1. Обґрунтовано доцільність використання розмірно-придатних брусків елементів вживаної деревини для отримання зрощених заготовок для виготовлення виробів з деревини. Підготовлено зрощені заготовки із вживаної деревини (ЗЗ із ВЖД) ялиці шляхом реалізації В-плану другого порядку, де змінними були ширина розмірно-придатних брусків та довжина зубчастих шипів в брусках. Визначено експериментальним шляхом межю міцності під час статичного згину для ЗЗ із ВЖД ялиці та побудовано адекватну математичну (регресійну) модель залежно від ширини розмірно-придатних брусків з ялиці $V(x_1)$ та довжини зубчастих шипів в брусках $D(x_2)$. Визначено, що ширина рейки з ялиці $V(x_1)$ в конструкції ЗЗ із ВЖД призводить до суттєвого збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u (від 16,17 до 19,40 %). Натомість, тенденція щодо залежності впливу довжини зубчастих шипів в брусках $D(x_2)$ на збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u є менш суттєвою (від 10,58 до 14,03 %).

2. Виявлено, що збільшення довжини зубчастого шипа ЗЗ із ВЖД ялиці від 10 до 20 мм приводить до зростання межі міцності при статичному згині на 5,78 %, а від 10 до 30 мм – на 10,58 %.

3. Встановлено, що отримані межі міцності σ_u для всіх зразків експериментальних зразків ЗЗ із ВЖД ялиці не залежно від їх конструкції, задовольняють нормативні вимоги для первинної деревини ялиці (84,5 МПа). Встановлено за результатами експериментальних досліджень, що що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 72,2478$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши розмірні параметри ширини розмірно-придатних брусків з ялиці $V = 56$ мм та довжини зубчастих шипів в брусках $D = 30$ мм

4. З практичного досвіду рекомендовано використовувати ВЖД для виробництва зрощених заготовок з перерізом розмірно-придатних брусків у відношенні товщина-ширина не більшим 1:3 з довжиною зубчастого шипа для заготовок ґратчастих меблів – 30 мм, а для меблевого щита та столярної плити – 10 мм.

References

1. **Circular economy** industry platform. <http://www.circular.eu/project/renault-closed-loop>.
2. **Gayda S.V.** (2017). Комплексні дослідження зміни пружних властивостей вживаної деревини ялиці з віком / *Kompleksni doslidzhennya zminy pruzhnykh vlastyvostey vzhvyvanoyi derevyiny yalytsi z vikom* [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>
3. **Gayda S.V.** (2000): Матеріали для виготовлення виробів з деревини / *Materials for the Production of wood Productss*. Lviv: BMC. – 160 p. (in Ukr.).
4. **Gayda S.V., Maksymiv V.M.** From recycled post-consumer wood towards prime quality particleboard / Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть // міжвід. наук.-техн. зб. – Львів: НЛТУ України. – 2010, вип. 36. – С. 57-77.
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.
6. **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).
7. **Gayda S.V.** (2009). Potential of post-consumer recovered wood and possible ways of it using in Ukraine // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 35:63-83.
8. **Gayda S.V.** (2013). Resource-saving technologies of recycling of post-consumer wood]. *Scientific Bulletin of NULES of Ukraine: Technology and Energy of agroindustrial complex* 185(2):271-280, (in Ukrainian).
9. **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.
10. **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).
11. **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 of forest complex* 38:212-216 (in Russian).
12. **Gayda S.V.** (2016): A investigation of form of stability of variously designed blockboards made of post-consumer wood. *ProLigno* 12(1):22-31.
13. **Gayda S.V.** (2015). Modeling properties of blockboards made of post-consumer wood on the basis of the finite element method. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 41, 39-49. <https://doi.org/10.36930/42154106>
14. **Gayda S.V.** (2016). A form of stability of blockboards made of post-consumer wood. *Actual problems of forest complex*, 46, 148-153 (in Russian).
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, (in Russian).
16. **Gayda S.V.** (2016). Research on physical and mechanical characteristics of front blockboards made from post-consumer wood [Дослідження фізико-механічних характеристик фасадних столярних плит із вживаної деревини]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 42: 33-50.
17. **Gayda S.V.** (2016). Технологічні підходи до поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом / *Tekhnolohichni pidkhody do poverkhnevoho ochyshchennya*

vzhyvanoyi derevyny holkofrezernym instrumentom [Technological approaches to cleaning of surface of post-consumer wood of needle-milling tools]. Bulletin of KhNTUA 178:3-11(in Ukrainian).

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 (in Russian).

19. **Gayda S.V.** (2016). Технологічні підходи до поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом / *Tekhnolohichni pidkhody do poverkhnevoho ochyshchennya vzhyvanoyi derevyny holkofrezernym instrumentom* [Technological approaches to cleaning of surface of post-consumer wood of needle-milling tools]. Bulletin of KhNTUA 178:3-11(in Ukrainian).

20. **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. <https://doi.org/10.36930/42174301> (in Ukrainian).

21. **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. <https://doi.org/10.36930/42184402> (in Ukrainian).

22. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). Bulletin of KhNTUA 197:3-9, (in Ukrainian).

23. **Gayda S.V.** (2018). Технологія МДФ-фасадів / *Tekhnolohiyi MDF-Fasadiv* [MDF Facade Technologies]. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 44:70-83 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184410>

24. **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).

25. **Gayda S.V.** (2020). Analysis of structures and technologies of manufacture of modern furniture facades. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 46, 54-64. <https://doi.org/10.36930/42204606> (in Ukrainian).

26. **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).

27. **Gayda S.V., Bilyy Ya.M.** (2016). The investigation of the shape stability of glued panels made of post-consumer wood. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 42, 69-79. <https://doi.org/10.36930/42164211> (in Ukrainian).

28. **Gayda S.V.** (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.

29. **Gayda S.V., Dyak, T.II.** (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. <https://doi.org/10.36930/421137221>] (in Ukrainian).

30. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2013). Технология очистки вторично используемой древесины иглофрезерными станками [The technology of cleaning recycled wood with needle milling machines] // Actual problems and prospects of the development of LPK: materials II NTK., September 9-11, 2013 – Kostroma. – P. 36-39.

31. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2018). Shape stability as a quality criterion for PCW-made blockboards. Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, 17, 185-192. <https://doi.org/10.15421/411834> (in Ukrainian)

32. **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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212484>.

33. **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>.

34. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2021). Властивості вживаної деревини як визначальний чинник якості меблевих виробів / *Vlastyvosti vzhyvanoyi derevyny yak vyznachal'nyy chynnyk yakosti meblevykh vyrobiv* [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). <https://doi.org/10.15421/412135>

35. **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>.
36. **Gayda S.V., Kiyko O.A., Guz, M.M.** (2022): Research of the structure of stump and root-wood 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>
37. **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>
38. **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. <https://doi.org/10.36930/42234903> (in Ukrainian).
39. **Orikhovskyy R.Ya., Gayda S.V.** (2024). Determination of running time losses in automated processing systems of woodworking, [Оріховський Р.Я., Гайда С.В. Оцінювання ефективності використання робочого часу в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 41-51 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245004>
40. **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].
41. **Gayda S.V., Petryshak I.V.** (2020). Study of the influence of breed and grinding modes on the specific productivity of grinding skin. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 5-15. <https://doi.org/10.36930/42204601> (in Ukrainian).
42. **Gayda S.V., Voytovych I.G., Orikhovskyy R.Ya.** (2020). Дослідження технологічних процесів виготовлення ніжок столів обідніх різних конструкцій / *Doslidzhennya tekhnolohichnykh protsesiv vyhotovlennya nizhok stoliv obidnikh riznykh konstruktsiy* [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>
43. **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 (in Ukrainian).
44. **Gayda, S.V.** (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. 2011). TU Zvolen. – P. 108-121.
45. **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.
46. **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>
47. **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>
48. **Lesiv, L.E.** (2020). Study of the characteristics of combined of blockboards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 48, 69-86. <https://doi.org/10.36930/42224806> (in Ukrainian).
49. **Medvid, L.V.** (2018). Systematization of wood waste – the basis of their effective use. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 91-104. <https://doi.org/10.36930/42184412> (in Ukrainian).
50. **Medvid, L.V.** (2021). Post-consumer wood – an additional reserve of raw materials for construction materials. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 47, 34-46. <https://doi.org/10.36930/42214706> (in Ukrainian).

51. 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>.
52. 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>
53. 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).
54. Project «CircHive. (2022). 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.
55. 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, <https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1342859>.
56. 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>.
57. 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, <https://doi.org/10.1080/14942119.2017.1318549>.

UDC 674-419.33:674.8

Post-graduate student L.E. Lesiv;

prof. S.V. Gayda, Doktor of Sciences; senior lecturer L.V. Salapak – UNFU

Development of a mathematical model of the strength of joined preparations from post-consumer fir wood

The expediency of using dimensionally suitable block elements of post-consumer wood for obtaining spliced blanks for the manufacture of wood products is substantiated. Spliced blanks from used fir wood were prepared by implementing the B-plan of the second order, where the variables were the width of dimensionally suitable bars and the length of the toothed spikes in the bars. The limit of strength during static bending for spliced blanks from post-consumer fir wood was determined experimentally and an adequate mathematical (regression) model was built depending on the width of dimensionally suitable fir bars $B(x_1)$ and the length of tooth-shaped spikes in bars $D(x_2)$. It was determined that the width of the fir bar $B(x_1)$ in the construction of the jointed blanks leads to a significant increase in the strength limit during static bending σ_u (from 16.17 to 19.40%). On the other hand, the trend regarding the dependence of the length of toothed spikes in bars $D(x_2)$ on the increase in strength limit during static bending σ_u is less significant (from 10.58 to 14.03%). It was found that an increase in the length of the toothed spike from 10 to 20 mm leads to an increase in the strength limit under static bending by 5.78%, and from 10 to 30 mm – by 10.58%. It was established that the obtained strength limits σ_u for all samples of experimental samples of spliced blanks from post-consumer fir wood, regardless of their design, meet the regulatory requirements for primary fir wood (84.5 MPa). Based on the results of experimental studies, it was established that the maximum value of the strength limit during static bending $\sigma_u = 72.2478$ MPa, taken as an absolute value, can be obtained by fixing the dimensional parameters of the width of dimensionally suitable fir bars $B = 56$ mm and the length of the teeth – those spikes in bars $D = 30$ mm. Based on practical experience, it is recommended to use used wood for the production of jointed blanks with a cross-section of dimensionally suitable bars in the thickness-width ratio of no more than 1:3 with a toothed spike length of 30 mm for lattice furniture blanks, and for furniture panels and joinery boards – 10 mm.

Keywords: post-consumer wood, jointed blanks, mathematical model, technology, strength, gluing, processing, white fir (*Abies alba* Mill), circular economy.

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ПОКАЗНИКІВ ОСНОВНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В КОНТЕКСТІ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ

Проаналізовано стан та проблеми 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 шестирічний період (2018-2023 рр.) із середніми показниками виробництва для таких матеріалів: деревинностружкові плити (2698,6 тис. м³), орієнтовано-стружкові плити з деревини (152,7 тис. м³), деревинноволокнисті плити MDF середньої щільності (240 тис. м³), фанера (191,83 тис. м³) та шпон (235,33 тис. м³). Детально проаналізовано динаміку виробництва деревинностружкових плит в Україні за період з 2018 по 2023 рр. з індексами зростання та спадання : 2018/2019 – 88,90 %; 2019/2020 – 97,01 %; 2020/2021 – 133,80 %; 2021/2022 – 108,79 %; 2022/2023 – 94,86 %. Розглянуто тенденцію показників імпорту конструкційних матеріалів (ДСП, фанери, MDF) до України від шести країн-партнерів за період з 2021 по 2023 рр., що засвідчує скорочення імпорту у 2,15 рази – з 312 до 145 млн \$ США, зокрема, частка імпорту конструкційних матеріалів у 2023 р. становила для Польщі (41,28%), Туреччини (20,73%), Румунії (16,27%), Німеччини (13,24%), Латвії (3,98%), Італії (2,35%), Китаю (2,16%). Проаналізовано загальну динаміку розвитку деревинної плитної продукції країн ЄС з 2021 по 2023 рр. для всіх типів плит (від ДСП до фанери, через MDF, OSB, тверді і м'які плити). При випуску продукції на рівні 56,5 млн м³ у 2023 р. визначено відсоток зменшення протягом трьох років на рівні 12,9%. Розглянуто перспективи виробництва деревинних конструкційних плитних матеріалів в Україні 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. Розроблено шляхи забезпечення сировиною деревообробну галузь в контексті циркулярної економіки, зокрема для виробництва щитових конструкційних матеріалів.

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. 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. Крім того, функціонування деревообробної галузі в рамках циркулярної економіки є ключовим

¹ Гайда Сергій Володимирович – член-кореспондент 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@nlту.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7468-5661> ResearcherID: ABB-1636-2021 Scopus/authorID=57221587964

фактором для забезпечення сталого розвитку України. Це вимагає активної участі всіх зацікавлених сторін, включаючи уряд, бізнес та наукові установи, для впровадження відповідних політик, інновацій та практик.

Мета дослідження – оцінити стан, обґрунтувати проблеми та розробити шляхи розвитку деревообробної галузі в контексті циркулярної економіки, аналізуючи динаміку показників виробництва основних щитових конструкційних матеріалів для меблевого виробництва.

Аналіз наукових праць присвячених залучення додаткових деревинних ресурсів для виробництва конструкційних плитних матеріалів в контексті циркулярної економіки. Деревообробна галузь має великий потенціал для реалізації принципів циркулярної економіки завдяки своїм особливостям та можливостям для повторного використання матеріалів. Тому, тематиці вирішенні проблем сировини присвячено багато наукових праць, зокрема:

- Дослідження присвячені аналізу додаткових деревинних ресурсів [11, 21, 24, 25, 37, 45], вживаної деревини [13, 23, 28, 36, 41, 44, 46] за кількісними та якісними характеристиками [15-18].
- Дослідження присвячені ВЖД, як перспективному ресурсу для використання у виробництві конструкційних матеріалів [9, 10, 11, 17, 22, 23, 29, 33, 35].
- Дослідження присвячені переробленню деревинних залишків [28] та відходів в подрібненому вигляді на вироби: деревостружкові плити (ДСП) [5, 7, 20, 43], деревоволокнисті плити (MDF) [5, 15, 16, 43] або OSB [5, 43].
- Дослідження присвячені переробленню вживаної деревини на конструкційні матеріали: столярні плити (СП) [8, 17, 21, 22, 29, 35], меблеві щити (МЩ) [11, 14, 28, 30, 39] або зрошені та гнуті заготовки [30, 31, 32, 33, 34].
- Дослідження присвячені розробленню прогресивних технологій з перероблення будь-яких додаткових ресурсів на вироби з деревини [6, 13, 21, 28, 47].
- Дослідження присвячені реалізації принципів циркулярної економіки в деревообробній галузі з метою сприяння економічного зростання, збереженню природних ресурсів, покращення екологічної ситуації та підвищення якості життя [1, 2, 3, 4, 17, 18, 38, 40, 42, 47].

Аналіз проблем деревообробної галузі з виробництва конструкційних плитних матеріалів в контексті циркулярної економіки вказує на кілька ключових аспектів, які пов'язані з високим рівнем відходів, проблемами з якістю вторинної сировини, широким асортиментом вживаної деревини, обмеженими можливостями перероблення, низькою екологічною свідомістю, високими витратами на впровадження нових технологій, відсутністю або недостатністю законодавчої бази, недостатньою кількістю технологічних рішень. Реалізація цих заходів може значно покращити ситуацію у деревообробній галузі, сприяти збереженню природних ресурсів, підвищенню екологічної стійкості України та поповненню сировинної бази для виробництва конструкційних плитних матеріалів, зокрема. Циркулярна економіка спрямована на мінімізацію відходів і максимальне використання ресурсів протягом всього життєвого циклу продукту. Це забезпечить не тільки збереження природних ресурсів, але й економічну вигоду за рахунок зниження витрат на сировину та утилізацію залишків та відходів.

Для подолання цих проблем деревообробній галузі необхідно впроваджувати інноваційні технології, покращувати управління ресурсами, підвищувати квалі-

ліфікацію кадрів та працювати над стійким розвитком. Важливим є також тісна співпраця з державними органами, громадськими організаціями та науковими інституціями для створення сприятливих умов для розвитку галузі. Впровадження актуальних пропозицій сприятиме стійкому розвитку деревообробної галузі, підвищенню її конкурентоспроможності та зниженню негативного впливу на довкілля. Важливо, щоб ці заходи були реалізовані в комплексі, за активної участі державних органів, бізнесу та громадськості.

Аналіз динаміки показників виробництва основних 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.

ДСП як щитовий конструкційний матеріал, в першу чергу, призначений для створення сховищ під час виробництва корпусних меблевих виробів. Споживання вітчизняної плити 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 2023 рр. наведено на рис. 1. Динаміка падіння та зростання обсягів виробництва ДСП в Україні між суміжними роками наступна : 2018/2019 – 88,90 %; 2019/2020 – 97,01 %; 2020/2021 – 133,80 %; 2021/2022 – 108,79 %; 2022/2023 – 94,86 %.



Рис. 1. Тенденція показників виробництва деревинностружкових плит в Україні, тис.м³ за період з 2018 по 2023 рр.

Для порівняння обсяги виробництва ДСП у Європі, млн.м³ наведено на рис. 2. У 2023 році у країнах ЄС було вироблено 30,9 млн. м³ ДСП плит.

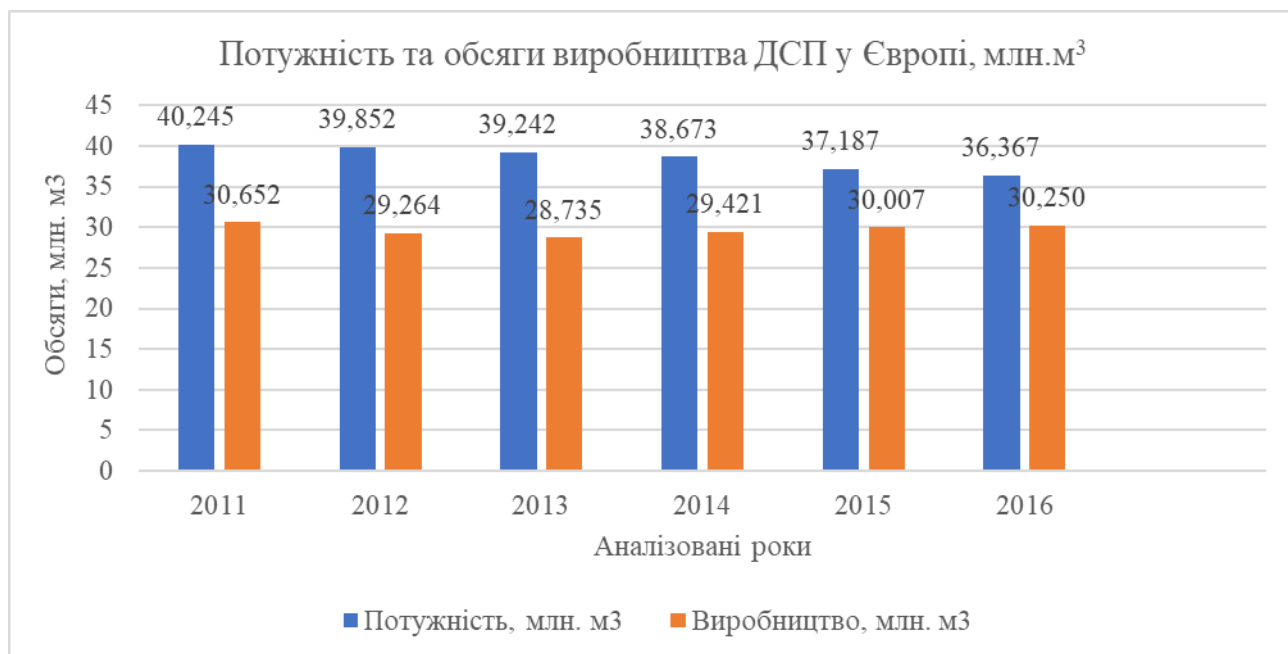


Рис. 2. Тенденція показників потужності та обсягів виробництва деревинно-стружкових плит у Європі, млн.м³ за період з 2011 по 2016 рр.

Перспективним конструкційним матеріалом, що випускається в Україні є OSB плити.

Тенденція показників виробництва OSB плит в Україні, тис.м³ за період з 2018 по 2023 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 %.



Рис. 3. Тенденція показників виробництва OSB плит в Україні, тис.м³ за період з 2018 по 2023 рр.

Виробництво OSB плит у світі розвивається швидкими темпами. Основні імпортери цих плит такі як США та Канада стрімко будують нові заводи. Країни ЄС також не відстають. Якщо у 1997 р. в Європі було виготовлено тільки 0,6 млн. м³ OSB плит, то у 2023 р. у країнах ЄС було вироблено 6,6 млн. м³ (рис. 4).

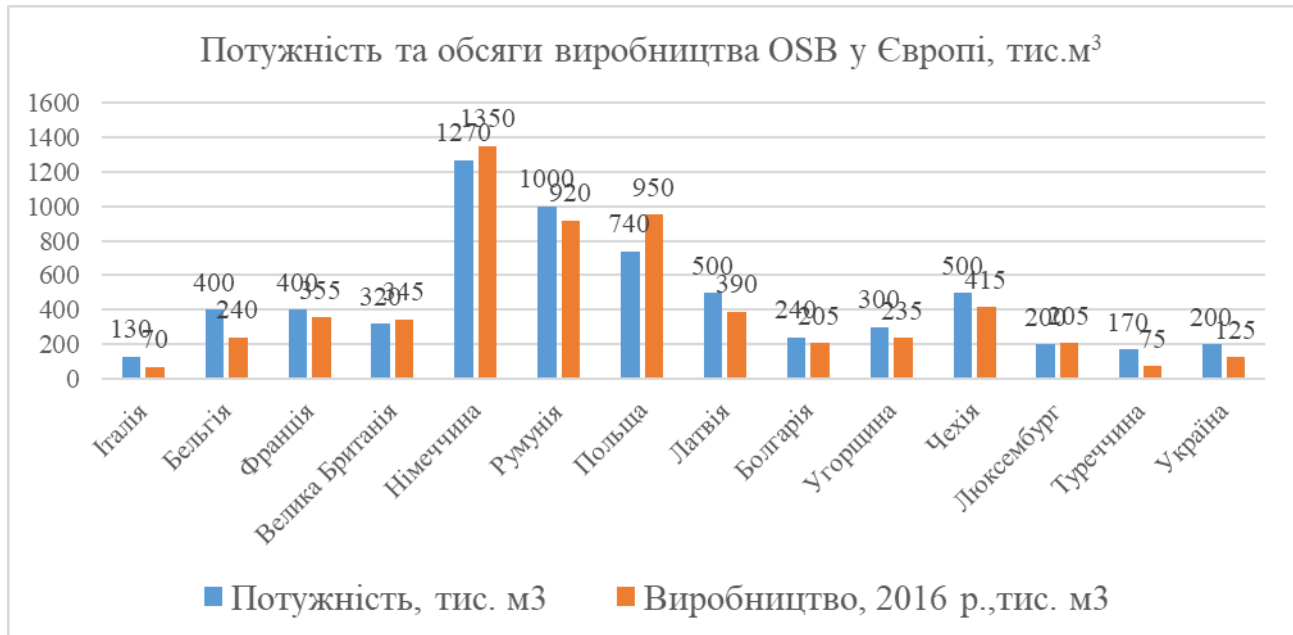


Рис. 4. Потужності та обсяги виробництва OSB плит у Європі, тис.м³

Іншим конструкційним матеріалом є деревинноволокнисті плити (ДВП). 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). Дані плити мають однорідну дрібнодисперсну структуру та однакові фізико-механічні властивості у всіх напрямках, що зумовлює їх високі показники. Наприклад, для плит товщиною 18 мм при щільності 700...750 кг/м³, межа міцності при згині становить 40 МПа; межа міцності при розтягу перпендикулярно пласті – 0,8 МПа; модуль пружності – 3500 МПа.

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 2023 році в Україні склало близько 400-450 тис. м³, що, при населенні України у 2023 р. на рівні 33,2 млн осіб, становить 12-13,5 м³/1000 чоловік. Оскільки, в країнах ЄС споживання деревинноволокнистих плит становить майже 11 млн. м³, а при населенні 448,4 млн осіб в 2023 р., показник на 1000 чоловік сягав 24,5 м³. Тому, вбачається високий потенціал розвитку цього ринку в Україні, зокрема протягом наступних 5-8 років він 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.

Тенденція показників виробництва MDF-плит середньої щільності (400-800 кг/м³) в Україні, тис.м³ за період з 2018 по 2023 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 %.

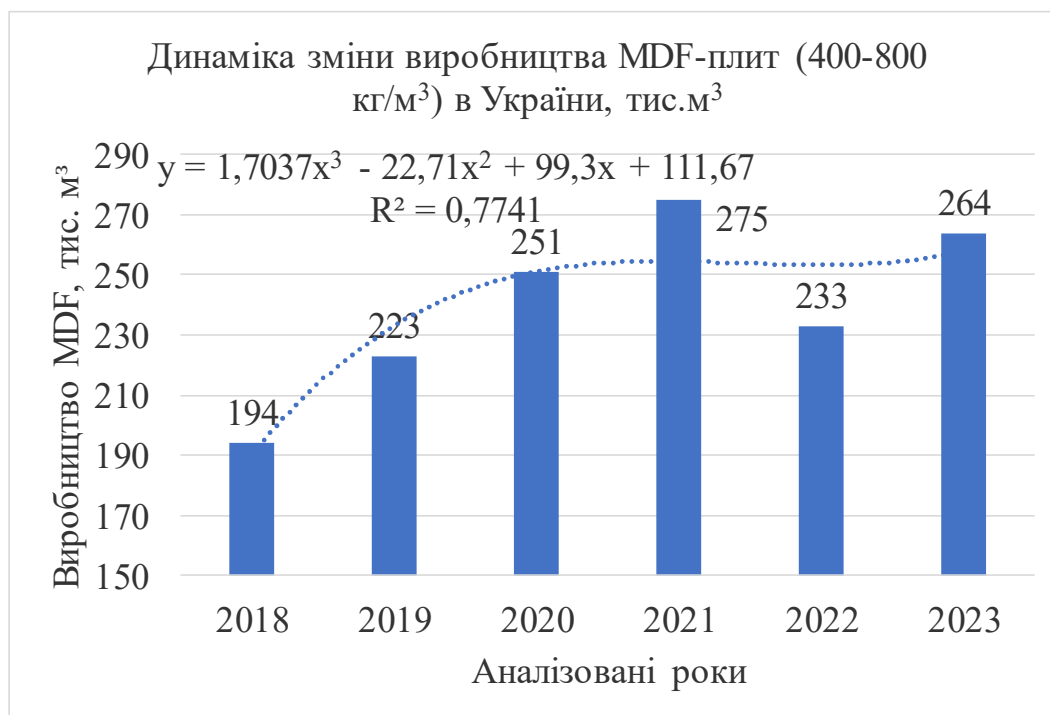


Рис. 5. Тенденція показників виробництва MDF-плит середньої щільності (400-800 кг/м³) в Україні, тис.м³ за період з 2018 по 2023 рр.

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 2023 році у країнах ЄС було вироблено 11,1 млн. м³ MDF плит.

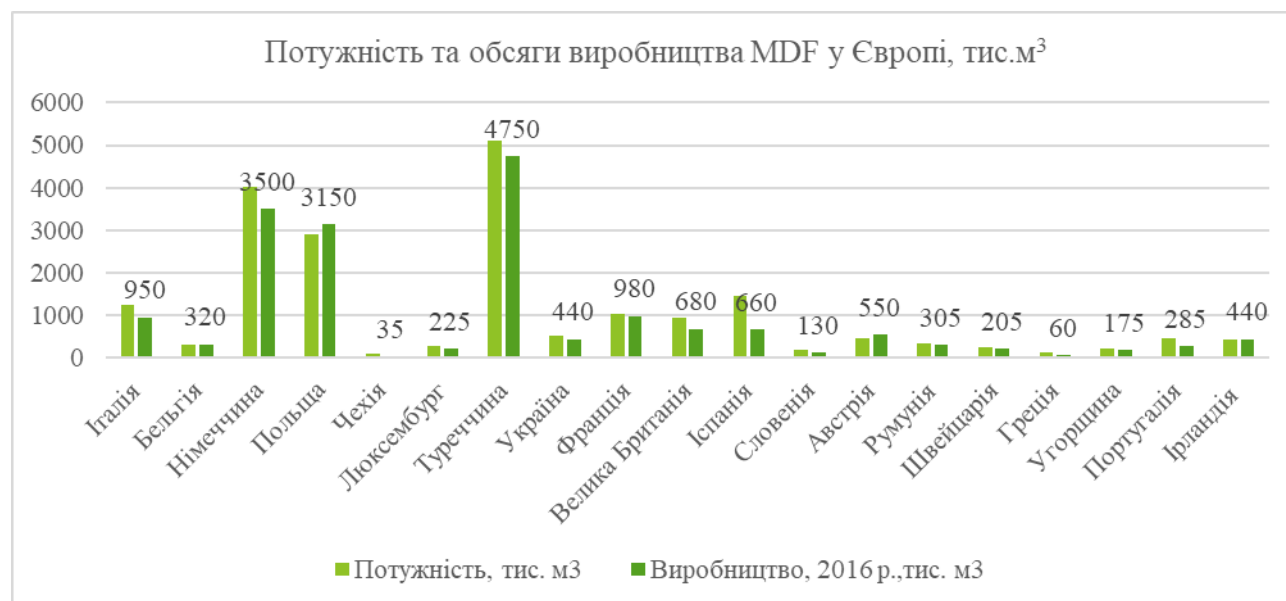


Рис. 6. Потужності та обсяги виробництва MDF плит у Європі, тис.м³ у 2016 р.

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 2023 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 %. Для порівняння у 2023 р. у країнах ЄС було вироблено 2,6 млн. м³ фанери.



Рис. 6. Тенденція показників виробництва фанери в Україні, тис.м³ за період з 2018 по 2023 рр.

Тенденція показників виробництва шпону в Україні, тис.м³ за період з 2018 по 2023 рр. наведено на рис. 7. Динаміка падіння та зростання обсягів виробництва шпону в Україні між суміжними роками наступна : 2018/2019 – 101,41 %; 2019/2020 – 95,83 %; 2020/2021 – 116,91 %; 2021/2022 – 108,68 %; 2022/2023 – 103,04 %.



Рис. 7. Тенденція показників виробництва шпону в Україні, тис.м³ за період з 2018 по 2023 рр.

Загальна динаміка розвитку деревинної плитної продукції країн ЄС була представлена у звіті EPF (European Wood-based Panels Federation) 19-21 червня 2024 року в Ризі на загальних зборах Європейської федерації деревинних плит, які проводив Latvijas Finieris. Організація EPF представила результати виробництва європейського сектору деревинних плит за 2023 рік для всіх типів плит (від ДСП до фанери, через MDF, OSB) і за всіма регіонами Європи. Тенденція показників виробництва деревинних плит європейського сектору, млн.м³ за період з 2021 по 2023 рр. наведено на табл. 1. Динаміка падіння загальних обсягів виробництва деревинних плит в країнах ЄС між суміжними роками наступна : 2023/2021 – на 12,9 %; 2022/2021 – на 7,1 %; 2023/2022 – на 6,3 %.

Таблиця 1. Динаміка виробництва деревинних плит в країнах ЄС, млн.м³

Продукція	Production	2023	2022	2021	23/22	22/21	23/21
ДСП	Particleboard	30,9	32,5	34,5	-5,0	-5,9	-10,5
MDF	MDF	11,1	12,5	13,8	-11,4	-9,3	-19,6
ОСБ	OSB	6,6	6,5	7,2	2,0	-10,2	-8,4
Тверді плити	Hardboard	0,4	0,5	0,5	-17,0	-4,5	-20,7
М'які плити	Softboard	4,8	5,2	5,6	-6,1	-8,6	-14,2
Фанера	Plywood	2,6	3,1	3,1	-15,2	-1,8	-16,7
Сума	Total	56,5	60,2	64,8	-6,3	-7,1	-12,9

Аналіз імпорту основних компонентів для меблевих виробів. Тенденція показників імпорту конструкційних матеріалів (ДСП, фанери, MDF) до України тис. \$ США від шести країн-партнерів за період з 2021 по 2023 рр. наведено на рис. 8. Загалом обсяг імпорту ДСП, MDF та фанери протягом 2022 та 2023 рр. скоротився вдвічі – з 312 до 145 млн \$ США. За даними Державної митної служби України, частка імпорту конструкційних матеріалів у 2023 р. за згаданими країнами була наступною: Польща (41,28%), Туреччина (20,73%), Румунія (16,27%), Німеччина (13,24%), Латвія (3,98%), Італія (2,35%), Китай (2,16%).

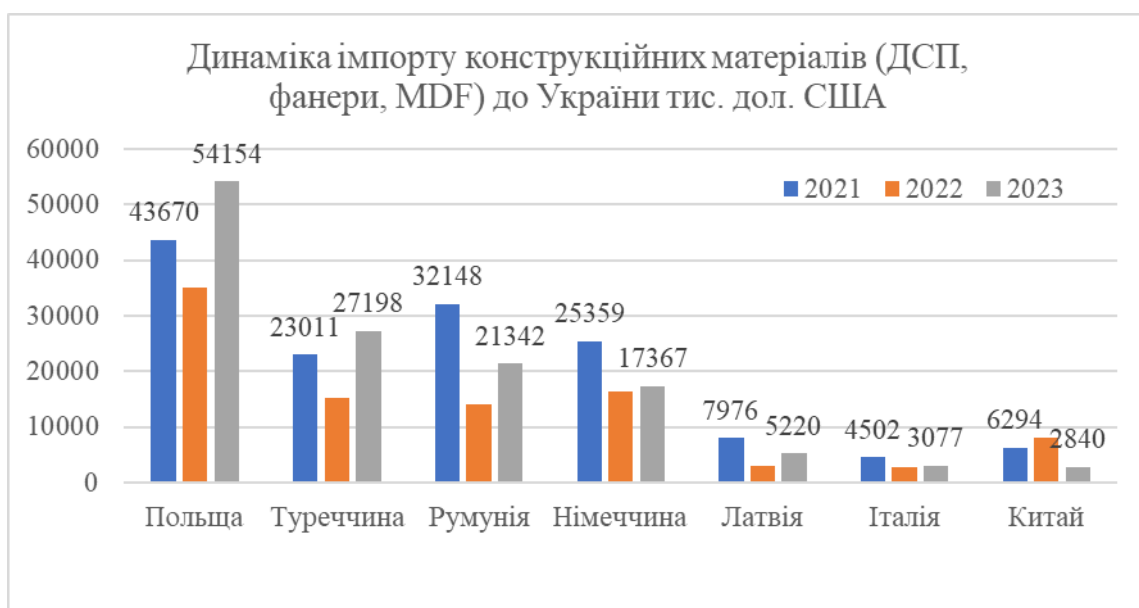


Рис. 8. Тенденція показників імпорту конструкційних матеріалів (ДСП, фанери, MDF) до України тис. \$ США за період з 2021 по 2023 рр.

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 методом впровадження ефективних технологій щодо залучення цього додаткового ресурсу до виробництва конструкційних матеріалів.
- Реалізація принципів циркулярної економіки шляхом підтримки програм 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. Проаналізовано стан та проблеми 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.

2. Проаналізовано показники плитної продукції за шестирічний період (2018-2023 рр.) із середніми показниками виробництва для таких матеріалів: деревинностружкові плити (2698,6 тис. м³), орієнтовано-стружкові плити з деревини (152,7 тис. м³), деревинноволокнисті плити MDF середньої щільності (240 тис. м³), фанера (191,83 тис. м³) та шпон (235,33 тис. м³).

3. Детально проаналізовано динаміку виробництва деревинностружкових плит в Україні з 2018 по 2023 рр. з індексами зростання та спадання: 2018/2019 – 88,90 %; 2019/2020 – 97,01 %; 2020/2021 – 133,80 %; 2021/2022 – 108,79 %; 2022/2023 – 94,86 %.

4. Розглянуто тенденцію показників імпорту конструкційних матеріалів (ДСП, фанери, MDF) до України від шести країн-партнерів за період з 2021 по 2023 рр., що засвідчує скорочення імпорту у 2,15 рази – з 312 до 145 млн \$ США, зокрема, частка імпорту конструкційних матеріалів у 2023 р. становила для Польщі (41,28%), Туреччини (20,73%), Румунії (16,27%), Німеччини (13,24%), Латвії (3,98%), Італії (2,35%), Китаю (2,16%).

5. Проаналізовано загальну динаміку розвитку деревинної плитної продукції країн ЄС з 2021 по 2023 рр. для всіх типів плит (від ДСП до фанери, через MDF, OSB, тверді і м'які плити). При випуску продукції на рівні 56,5 млн м³ у 2023 р. визначено відсоток зменшення протягом трьох років на рівні 12,9%.

6. Розглянуто перспективи виробництва деревинних конструкційних плитних матеріалів в Україні 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. Розроблено шляхи забезпечення сировиною деревообробну галузь в контексті циркулярної економіки, зокрема для виробництва щитових конструкційних матеріалів.

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.circulary.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.** (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).
7. **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 of forest complex* 38:212-216 (in Russian).
8. **Gayda S.V.** (2015). Modeling properties of blockboards made of post-consumer wood on the basis of the finite element method. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 41, 39-49. <https://doi.org/10.36930/42154106>
9. **Gayda S.V.** (2016). A form of stability of blockboards made of post-consumer wood. *Actual problems of forest complex*, 46, 148-153 (in Russian).
10. **Gayda S.V.** (2016). Research on physical and mechanical characteristics of front blockboards made from post-consumer wood [Дослідження фізико-механічних характеристик фасадних столярних плит із вживаної деревини]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 42: 33-50.
11. **Gayda S.V.** (2016). Технологічні підходи до поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом / *Tekhnolohichni pidkhody do poverkhnevoho ochyshchennya vzhivanoyi derevyyny holkofrezernym instrumentom* [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.** (2017). A technology and properties of furniture board (FB) made of post-consumer wood (PCW). *Actual problems of forest complex*, 48, 34-38 (in Russian).
13. **Gayda S.V.** (2017). Комплексні дослідження зміни пружних властивостей вживаної деревини ялиці з віком / *Kompleksni doslidzhennya zminy pruzhnykh vlastyvostey vzhivanoyi derevyyny yalytsi z vikom* [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>
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. <https://doi.org/10.36930/42174301> (in Ukrainian).
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. <https://doi.org/10.36930/42184402> (in Ukrainian).
16. **Gayda S.V.** (2018). Технологія МДФ-фасадів / *Tekhnolohiyi MDF-Fasadiv* [MDF Facade Technologies]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 44:70-83 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184410>
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.** (2020). Analysis of structures and technologies of manufacture of modern furniture facades. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 54-64. <https://doi.org/10.36930/42204606> (in Ukrainian).
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. <https://doi.org/10.36930/42234908> (in Ukrainian).

20. **Gayda S.V., Dyak, T.II.** (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. <https://doi.org/10.36930/421137221> (in Ukrainian).
21. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2013). Технологія очистки вторично використовуваної деревини иглофрезерними станками [The technology of cleaning recycled wood with needle milling machines] // Actual problems and prospects of the development of LPK: materials II NTK., September 9-11, 2013 – Kostroma. – P. 36-39.
22. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2018). Shape stability as a quality criterion for PCW-made blockboards. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 17, 185-192. <https://doi.org/10.15421/411834> (in Ukrainian)
23. **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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212484>.
24. **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>.
25. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2021). Властивості вживаної деревини як визначальний чинник якості меблевих виробів / *Vlastyvosti vzhivanoyi derevyny yak vyznachal'nyy chynnyk yakosti meblevykh vyrobiv* [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). <https://doi.org/10.15421/412135>
26. **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>.
27. **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>
28. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). *Bulletin of KhNTUA* 197:3-9, (in Ukrainian).
29. **Gayda S.V., Petryshak I.V.** (2020). Study of the influence of breed and grinding modes on the specific productivity of grinding skin. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 5-15. <https://doi.org/10.36930/42204601> (in Ukrainian).
30. **Gayda S.V., Petryshak I.V., Humeniuk Zh.Ya.** (2021): Determination of the influence of rock and grinding modes on the surface roughness of wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 47:5-15 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214701>.
31. **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 (in Ukrainian).
32. **Gayda S.V., Voytovych I.G., Orikhovskyy R.Ya.** (2020). Дослідження технологічних процесів виготовлення ніжок столів обідніх різних конструкцій / *Doslidzhennya tekhnologichnykh protsesiv vyhotovlennya nizhok stoliv obidnikh riznykh konstruktsiy* [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>
33. **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>
34. **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>
35. **Lesiv, L.E.** (2020). Study of the characteristics of combined of blockboards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 48, 69-86. <https://doi.org/10.36930/42224806> (in Ukrainian).
36. **Medvid, L.V.** (2018). Systematization of wood waste – the basis of their effective use. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 91-104. <https://doi.org/10.36930/42184412> (in Ukrainian).
37. **Medvid, L.V.** (2021). Post-consumer wood – an additional reserve of raw materials for construction materials. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 47, 34-46. <https://doi.org/10.36930/42214706> (in Ukrainian).

38. 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>.
39. 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).
40. 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.
41. Ratajczak, E. (2003). *Zasoby odpadów drzewnych w Polsce* / E. Ratajczak, A. Szostak. Poznań: Czysza Energia, – Vol. 6. – P. 122-125.
42. Reike, D., & Vermeulen Walter, J.V. (2018). The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? // *Resources, Conservation and Recycling*. P. 246-264.
43. State Statistics Service of Ukraine. <https://www.ukrstat.gov.ua>
44. 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, <https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1342859>.
45. Titus, B.D., Brown, K., & Helmisaari, H.S. 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>.
46. 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, <https://doi.org/10.1080/14942119.2017.1318549>.
47. 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>.

UDC 674.001

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

Analysis of the dynamics of indicators of basic construction materials in the context of the circular economy

The state and problems of the woodworking branch of the forestry complex of Ukraine are analyzed from the point of view of the circular economy, since this economic model emphasizes the implementation of its principles on the reduction of residues and waste, and the repeated comprehensive use of wood resources as a whole. The indicators of board production for the six-year period (2018-2023) were analyzed with the average production indicators for the following materials: wood particleboards (2698.6 thousand m³), oriented strand boards made of wood (152.7 thousand m³), medium density fiberboard MDF (240 thousand m³), plywood (191.83 thousand m³) and veneer (235.33 thousand m³). The dynamics of chipboard production in Ukraine for the period from 2018 to 2023 was analyzed in detail with growth and decline indices: 2018/2019 – 88.90%; 2019/2020 – 97.01%; 2020/2021 – 133.80%; 2021/2022 – 108.79%; 2022/2023 – 94.86%. The trend of indicators of the import of construction materials (particleboard, plywood, MDF) to Ukraine from six partner countries for the period from 2021 to 2023 was considered, which shows a 2.15-fold decrease in imports - from 312 to 145 million \$ USA, in particular, the share the import of construction materials in 2023 was for Poland (41.28%), Turkey (20.73%), Romania (16.27%), Germany (13.24%), Latvia (3.98%) , Italy (2.35%), China (2.16%). The general dynamics of the development of wooden board products of the EU countries from 2021 to 2023 for all types of boards (from particleboard to plywood, through MDF, OSB, hard and soft boards) were analyzed. With production output at the level of 56.5 million m³ in 2023, the percentage of decrease over three years was determined at the level of 12.9%. The prospects for the production of wooden structural board materials in Ukraine in the context of the circular economy, which consist, first of all, in the use of wood waste as the main idea of the circular economy regarding the transformation of waste and residues into a resource for the creation of wooden board materials, have been considered. such as chipboard, MDF and OSB, which definitely saves natural resources. Ways of providing the woodworking industry with raw materials in the context of the circular economy, in particular for the production of panel construction materials, have been developed.

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

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РОБОЧОГО ЧАСУ В АВТОМАТИЗОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМАХ ДЕРЕВООБРОБНОГО ВИРОБНИЦТВА

Розроблена методика оцінювання ефективності робочого часу в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва. Такий підхід використовується для аналізування і компонування автоматизованих ліній. Проведені дослідження стабільності технологічних операцій деревообробки та їх вплив на ефективність функціонування автоматизованих ліній. Встановлено, що причиною малої ефективності роботи автоматизованих ліній на підприємствах деревообробної галузі є малі значення параметрів стабільності технологічних операцій, а також накладні втрати робочого часу обладнання. Технологічні процеси обробки деревини піддаються значному впливу стохастичних дій, це розмірно-якісні характеристики сировини і матеріалів, параметри та стан технологічного обладнання, організація виробництва, зовнішні дії. Запропонована методика дозволяє формалізувати виробничий процес за допомогою теорії масового обслуговування. Застосовується імітаційне моделювання для дослідження компонування автоматизованих ліній і підвищення ефективності їх функціонування. Важливим завданням є оцінювання втрат робочого часу обладнання із високою точністю. Це забезпечить високу продуктивність виробництва. Значення втрат робочого часу залежить від кількості послідовно працюючих верстатів у лінії. Встановлено, що автоматизовані лінії з високою стабільністю функціонування обладнання та високими коефіцієнтами використання робочого часу мають значно вищу ефективність і продуктивність виробництва. Ефективність автоматизованих ліній із послідовним розміщенням верстатів нижча, внаслідок накладних втрат робочого часу роботи верстатів, які виникають у виробничому процесі. Здійснено оцінювання впливу на ефективність виробництва усіх складових втрат робочого часу обладнання з метою їх зменшення і підвищення продуктивності роботи автоматизованих ліній. Запропоновано метод обчислення, що передбачає застосування коректувального коефіцієнта для розрахунку автоматизованих ліній. Значення коефіцієнта залежить від кількості верстатів у технологічному потоці. Запропонована методика дає можливість точніше розраховувати реальні процеси функціонування ліній деревообробки.

Ключові слова: автоматизовані лінії деревообробного виробництва; деревообробне обладнання та верстати; компонування технологічних ліній; параметр стабільності технологічних операцій; ефективність автоматизованих ліній.

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

Постановка завдання даного дослідження полягає у тому, що важливо з метою підвищення ефективності автоматизованих ліній деревообробки здійснити аналіз втрат робочого часу обладнання. Важливо встановити причини і можливі шляхи підвищення продуктивності автоматизованих ліній. Подібні завдання намагалися вирішувати англійські і американські науковці Д. Вільямс [49], Б. Бадімен [2], Б. Тан, С. Гершвін [1], М. Стріт [42]. Їх науковці праці здебільшого на-

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 – член-кореспондент 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

дають значення вивченню технологічних процесів машинобудування. Дослідження автоматизованих ліній деревообробної галузі та показників функціонування виробничих систем проводили дослідники тривалий час [6, 7, 12, 15, 19, 22, 24, 27, 32, 33, 35, 37, 44, 45, 46]. Пропонувалися різні підходи підвищення продуктивності автоматизованих ліній, найчастіше, імітаційне моделювання роботи автоматизованої лінії. Наші дослідження присвячені дослідженню автоматизованих ліній деревообробного виробництва, які мають свої особливості. Дослідження автоматизованих ліній деревообробки з метою підвищення ефективності і продуктивності є актуальними сьогодні. Попередніх дослідження [3] не враховували усі складові втрати робочого часу верстатів. Важливо зменшувати втрати робочого часу обладнання і забезпечувати високу продуктивність роботи устаткування. Аналіз великої кількості наукових досліджень [1, 2, 3, 4, 5, 49] дозволив встановити, що однією із причин низької ефективності роботи автоматизованих систем є малі значення параметрів стабільності технологічних операцій. Такі причини є характерними для процесів оброблення деревини і деревинних матеріалів, перероблення вживаної деревини [8, 13, 21, 29, 31] з отриманням якісних конструкційних щитових матеріалів [11, 13, 16, 18, 22, 23, 34] з прогнозованими властивостями [9, 10, 14, 17, 26, 28, 30, 36].

Об'єкт дослідження – автоматизовані лінії деревообробного виробництва.

Предмет дослідження – методи розрахунку втрат робочого часу в автоматизованих виробничих системах, ефективність функціонування.

Мета роботи – оцінювання ефективності використання робочого часу обладнання, зменшення втрат робочого часу, забезпечення високої продуктивності роботи деревообробних автоматизованих ліній. Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження: здійснити аналіз наукових досліджень за даною тематикою; проаналізувати результати досліджень.

Аналіз наукових досліджень та наукових праць. Сучасні методи аналізування і оцінювання впливу значень параметра стабільності на ефективність автоматизованих ліній є недосконалими. Наприклад, використовується одне усереднене значення параметра стабільності для усіх верстатів автоматизованої лінії [5]. Методи визначення усереднених показників стабільності [3] розглядаються у залежності від компоновки технологічного обладнання. Розглядаються різні варіанти: послідовне, паралельне або змішане компонування верстатів залежно від технології обробки [49]. Для розрахунку коефіцієнтів використання робочого часу обладнання у двоверстатних лініях із жорсткими зв'язками виконувалося імітаційне моделювання сформульовані основні висновки та рекомендації для підвищення продуктивності ліній [38]. У наукових працях [38, 41] аналізується математичний апарат для моделювання процесу функціонування двоверстатної автоматизованої лінії з гнучким міжверстатним зв'язком. Обчислені коефіцієнти використання робочого часу і продуктивності ліній. Науковці запропонували застосування [39] впорядкування послідовності розташування верстатів різної продуктивності для структур триверстатних автоматизованих ліній зі стохастичною тривалістю оброблення заготовок. Встановлено ступінь впливу параметра Ерланга технологічних операцій на продуктивність виробничої системи.

Розроблені рекомендації компонування автоматизованих ліній з урахуванням раціональної послідовності стабільностей верстатів. Науковці намагаються вирі-

шити проблему формалізації показників ефективності функціонування автоматизованих ліній з жорстким компонуванням обладнання [40]. Проведені дослідження формування функціональних структур автоматизованих ліній із штучним інтелектом [4]. Проаналізовані функції та структури гнучких автоматизованих виробничих систем. Підтверджені принципи побудови систем автоматизованого контролю і керування технологічним процесом та гнучким автоматизованим виробництвом [14]. Проблема моделювання процесів функціонування автоматизованих ліній займаються науковці Массачусетського технологічного інституту (англ. *Massachusetts Institute of Technology*) у США [2, 42].

Результати досліджень. Параметр стабільності для ліній, які мають послідовне поєднання верстатів з **неоднаковими** циклами технологічних операцій t_i і параметрами стабільності обчислюють за формулою [3]:

$$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{t_{b,i}^2}{K_i}}, \quad (1)$$

де: $t_{b,i} = t_i/t$ – відносна тривалість циклу i -ої технологічної операції; t – тривалість технологічної операції; n – кількість технологічних операцій у технологічній лінії; K_i – параметр стабільності перебігу i -ої технологічної операції.

Параметр стабільності технологічної операції деревообробного виробництва обчислюють за формулою:

$$K_i = \frac{t_i^2}{D_i}, i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

де D_i – дисперсія тривалості i -ої технологічної операції.

Параметр стабільності для усіх n верстатів за формулою $K_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t_{ei}^2}{K_i}$. (3)

Для технологічних ліній послідовної структури із **однаковими** за значеннями тривалостями оброблення t_e на усіх технологічних операціях, параметр стабільності обчислюють за формулою

$$K_e = \frac{t_e^2}{n} \sum_{i=1}^n K_i^{-1} \quad (4)$$

Оскільки $t_e = 1/n$, то отримаємо $K_e = n / \sum_{i=1}^n K_i^{-1}$. (5)

В лініях із **послідовною** структурою компонування устаткування з **однаковою** продуктивністю, але різними параметрами стабільності операцій K_i , параметр стабільності K_e^{-1} буде розраховуватися

$$K_e^{-1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i^{-1}. \quad (6)$$

У технологічній лінії із послідовним розміщенням верстатів з **різними параметрами стабільності** технологічних операцій використовують усереднені параметри. У разі великої переваги в лінії устаткування, для якого характерна висока стабільність технологічних операцій, то усереднений параметр стабільності дорівнює високим параметрам стабільності [3]. Для лінії, що складається із двох верстатів приблизно однакової продуктивності, усереднений параметр стабільності технологічних операцій обчислюють за формулою $K_e = \frac{2}{K_1^{-1} + K_2^{-1}}$. (7)

Розрахунок параметра стабільності лінії значно залежить від кількості верстатів у лінії та стабільності. У технологічній лінії з трьох верстатів параметр стабільності обчислюють за формулою $K_e = \frac{3}{K_1^{-1} + K_2^{-1} + K_3^{-1}}$. (8)

Такий підхід розв'язує завдання аналізу і синтезу автоматизованих ліній з різними параметрами стабільності функціонування устаткування.

Під час функціонування автоматизованої лінії, яка складається із послідовно розміщених верстатів, виникають накладні втрати робочого часу, які зменшують ефективність використання усієї лінії. Значне накладання втрат робочого часу верстатів особливо є характерним у технологічних лініях деревообробного виробництва. У деревообробці додаткові втрати робочого часу верстатів становлять половину втрат робочого часу технологічного процесу, зокрема такі:

- у технологічному процесі використовуються різні види оброблення деревини та заготівок; технологічні лінії деревообробки мають велику кількість технологічних операцій;
- під час деревообробного виробництва обробляється велика кількість заготівок із різними параметрами і породами деревини, різних сортів та розмірів.

Важливо оцінити складові втрати робочого часу автоматизованої лінії із високою точністю для забезпечення високої продуктивності виробництва. Сучасні методи оцінювання значень накладання втрат робочого часу застосовуються для технологічних ліній з верстатами, що характеризуються однаковими параметрами [3, 5]. У технологічних лініях з двох послідовних верстатів, що мають різні номінальні продуктивності, використовують аналітичні залежності для обчислення накладених втрат робочого часу [3]. Для лінії, яка складається з трьох або більше послідовних верстатів із різною продуктивністю роботи застосовується наближене оцінювання таких втрат робочого часу. Використовують відповідні обчислення для двох верстатів, що поряд розташовані у лінії [3, 5].

Перший етап обчислення дозволяє знайти накладні втрати для двох перших верстатів. Обчислене значення продуктивності ділянки з двох верстатів використовують у наступному кроці розрахунків. Обидва верстати розглядають і математичному моделюванні як одна умовна одиниця. Вона взаємодіє з наступним верстатом. Здійснюються обчислення відповідних параметрів для нової умовної ділянки. Обчислення виконують до закінчення процесу. Разом із обчисленнями здійснюють імітаційне моделювання автоматизованої лінії на комп'ютері [3, 5]. Величина втрат робочого часу залежить від кількості верстатів, які працюють у лінії та розміщуються послідовно. В лініях, що мають верстати і технологічне обладнання із високою стабільністю, коефіцієнт накладання втрат робочого часу лінії обчислюють за такою формулою [3, 5]:
$$H_c = 1 + \frac{1}{(a-1) \cdot B}, \quad (9)$$

де: a – кількість верстатів у технологічному потоці; B – втрати робочого часу на окремому верстаті.

Втрати робочого часу автоматизованої лінії обчислюють згідно кількості верстатів у технологічній лінії і втрат робочого часу на окремих верстатах B . Розрахункові формули не ураховують стабільність технологічної операції. Гнучкі виробничі зв'язки між окремими верстатами також не враховані. У виробничих системах кількість верстатів, які мають однакові характеристики і з'єднані без накопичувальних пристроїв з індивідуальним ритмом роботи та мінімальною стабільністю тривалості технологічної операції параметр Ерланга буде таким $K=1$. Коефіцієнт додаткових втрат робочого часу цієї системи обчислюється за формулою [3]:
$$H_{ci} = 0,6333 - 0,6 / a, \quad 2 \leq a \leq 50. \quad (10)$$

Велика кількість дослідів на імітаційних комп'ютерних моделях і значна кількість варіантів компонування автоматизованих ліній підтверджують точність

розрахунків за формулою (10) у діапазоні $2 \leq a \leq 50$. У технологічних лініях, які використовують єдиний ритм роботи наступні технологічні операції розпочинаються одночасно. Тільки після закінчення попередніх операцій на усіх верстатах можна розпочати оброблення наступної заготовки. Втрати робочого часу у таких технологічних лініях є дуже великими.

Вони обчислюють за формулою:

$$H_{cl} = 1 - \left(\frac{a}{\mu} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Аналітичні моделі наближено оцінюють роботу реальних систем виробництва. З теорії масового обслуговування [2] для простої моделі виробничої системи із двох послідовно розміщених верстатів і продуктивністю $\square_1$ і $\square_2$ коефіцієнт використання робочого часу першого і другого верстатів обчислюють за допомогою

формул:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 &= \frac{1 - \mu^2}{1 - \mu^3} = \frac{1 + \mu}{1 + \mu + \mu^2} \\ \rho_2 &= \mu \cdot \rho_1, \quad \mu = \mu_1 / \mu_2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Обчислюємо коефіцієнти накладання втрат робочого часу для 1-го верстата у технологічній лінії за формулою $H_1 = 1 - \rho_1 = 1 - \frac{1 + \mu}{1 + \mu + \mu^2} = \frac{\mu^2}{1 + \mu + \mu^2}$. (13)

Для другого верстата у технологічній лінії виконуємо обчислення коефіцієнта накладання втрат робочого часу за такою формулою

$$H_2 = 1 - \rho_2 = 1 - \mu \cdot \rho_1 = 1 - \frac{\mu + \mu^2}{1 + \mu + \mu^2} = \frac{1}{1 + \mu + \mu^2}. \quad (14)$$

Наступне відношення описує коефіцієнти накладання втрат робочого часу двох верстатів технологічної лінії $H_1/H_2 = \mu^2 = \mu_1^2/\mu_2^2$. (15)

Між коефіцієнтами накладання втрат робочого часу існує зв'язок

$$H_1 = \mu^2 \cdot H_2. \quad (16)$$

За допомогою отриманих залежностей аналізується виробничий процес і оцінюється взаємодія двох верстатів у лінії. Для багатofазних виробничих систем теж можна використовувати такий метод. У цьому методі використовують послідовний попарний верстатний аналіз втрат робочого часу устаткування. Такий метод при обчисленнях дає дещо завищені результати із запасом. Ступінь завищення зростає із збільшенням кількості верстатів у технологічній лінії.

Попарний верстатний розрахунок автоматизованих ліній не ураховує те, що у реальних процесах відбуваються одночасні затримки заготовок на деревообробних верстатах і втрати робочого часу не додаються. Значення завищення додаткових втрат робочого часу збільшується із збільшенням кількості верстатів у технологічному потоці. Для здійснювання моделювання багатofазних технологічних ліній використовуються моделі парної взаємодії із різним накладанням втрат робочого часу. У розрахункових формулах вводять коректувальний коефіцієнт, який може змінюватися, залежно від кількості верстатів в автоматизованій лінії. Цей метод буде відповідати дійсному показникові накладання втрат робочого часу у технологічній лінії.

Забезпечується необхідна точність покрокового розрахунку втрат робочого часу за допомогою показника степеня n у формулах (17-18) залежно від кількості верстатів у автоматизованій лінії. Отримаємо такі формули:

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= 1 - \rho_1 = 1 - \frac{1 - \mu^n}{1 - \mu^{n+1}} = \mu^n \frac{1 - \mu}{1 - \mu^{n+1}} \\ H_2 &= 1 - \rho_2 = 1 - \mu \frac{1 - \mu^n}{1 - \mu^{n+1}} = \frac{1 - \mu}{1 - \mu^{n+1}} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Залежності мають задовільні результати. Використовується залежність між показником степеня n і кількістю верстатів у лінії $n = \sqrt[3]{4a}$, $2 \leq a \leq 30$ (18)

Якщо кількість верстатів у технологічній лінії змінюється від 2 одиниць до 30, тоді показник степеня n збільшується до 4,9 (рис. 1).

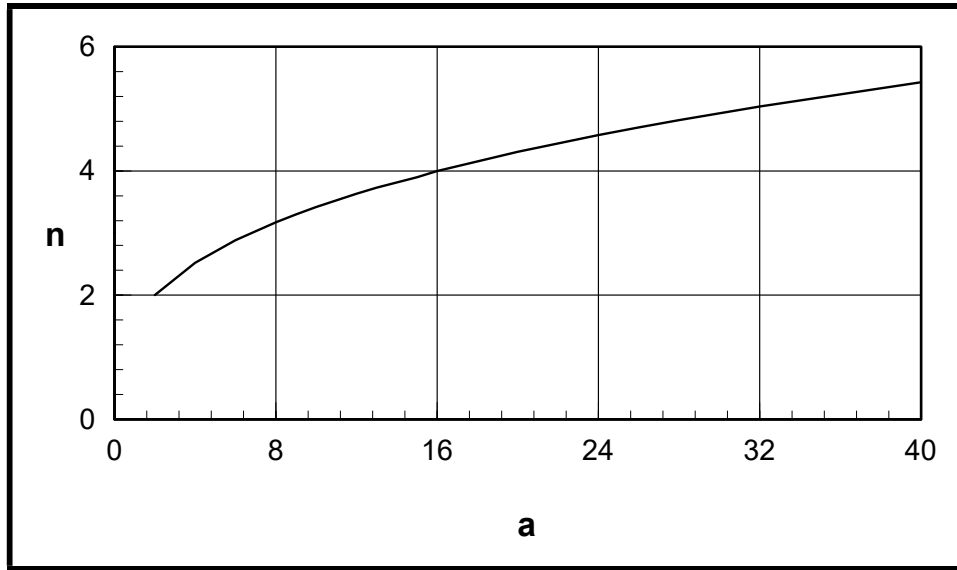


Рис. 1. Залежність показника n від кількості верстатів a в лінії

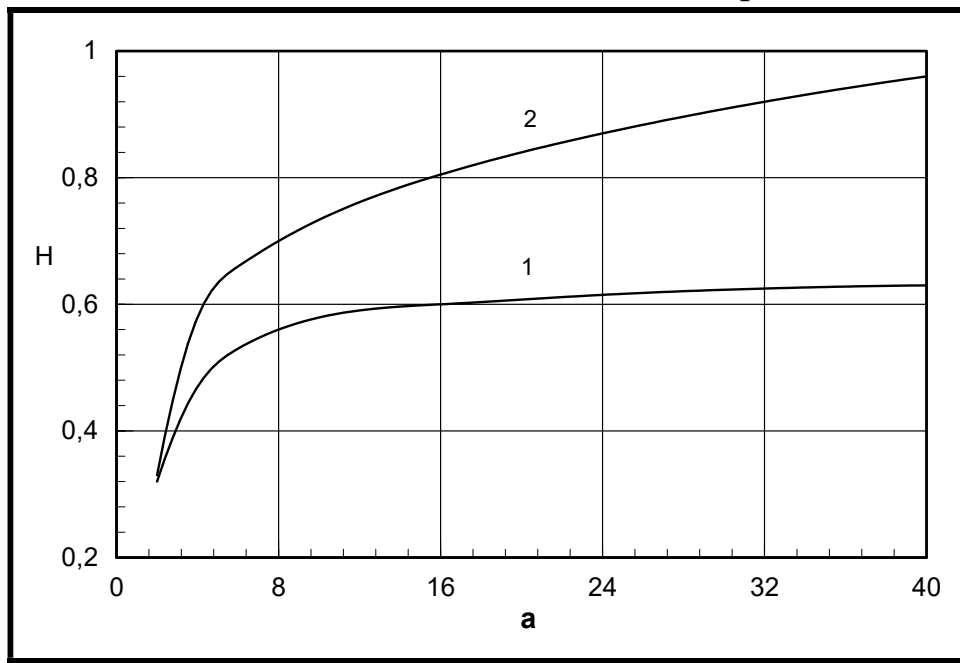


Рис. 2. Фактичне (1) та обчислене (2) значення коефіцієнта втрат робочого часу залежно від кількості верстатів a в автоматизованій лінії

Методика розрахунку за методом послідовного аналізу пар верстатів в автоматизованій лінії дає змогу отримувати завищені результати обчислень із запасом (рис. 2). Накладні втрати робочого часу верстатів, обчислюють за допомогою формул (17) з використанням показника степеня n (18). Дійсні значення коефіціє-

нта накладених втрат робочого часу верстатів обчислюють за допомогою формули (19)

$$H_T = 1 - \left(\frac{2}{3}\right)^{\log_2 a}. \quad (19)$$

В однакових умовах функціонування автоматизованих ліній, для обчислення накладних втрат робочого часу верстатів формули (10) та (20) дають можливість отримувати наближені розрахункові значення.

$$H_n = 1 - \left(\frac{n}{n+1}\right)^{\log_2 a} = 1 - (1 + n^{-1})^{-\log_2 a} = 1 + \left[1 + (4a)^{-1/3}\right]^{-\log_2 a}, \quad 2 \leq a \leq 30. \quad (20)$$

Обговорення та аналіз результатів. Вивчення наукових праць з даної тематики, показує, що дослідники використовують різні підходи до вирішення цієї проблеми. Наприклад, науковці [47] розглядають безперервну виробничу систему з двох верстатів із буфером кінцевої ємності. Верстати піддаються відмовам, ремонтам та профілактичному технічному обслуговуванню залежно від стану. Верстати можуть переходити у кілька станів, які характеризуються різними параметрами продуктивності, починаючи від ідеальної роботи до повного вимкнення. Пропонуємо детальніше розглядати функціонування виробничої системи з урахуванням стохастичних впливів на виробничий процес. Це забезпечить точніші розрахунки. У науковій роботі [42] виробнича лінія має декілька робочих верстатів, з'єднаних між собою послідовно. Щоб забезпечити високу продуктивність, буфери розподіляються між суміжними верстатами.

Ця виробнича система називається системою серійного виробництва з проміжними буферами. Верстат у виробничій системі не може виконувати заплановані завдання, якщо вихідний буфер порожній або наступний буфер заповнений. Перерви у роботі забезпечують додаткові можливості для обслуговування верстатів. Такий підхід до імітаційного моделювання також використовується у наших моделях. Застосування нашого методу дозволяє компенсувати втрати робочого часу верстатів. У науковій роботі [48] розглядається інноваційна стратегія технічного обслуговування виробничої системи. Технологічна лінія містить пошкоджений верстат і має буферний запас. Із збільшенням кількості технологічних операцій стан верстата погіршується. Зростає виробничий брак. Стохастичний процес підвищує кількість дефектів і відмов. Для відновлення верстата приймають рішення. Пропонують застосовувати гібридний метод оптимізації порядку обслуговування виробничої системи. Гібридний метод ураховує інтеграцію модифікованого методу прийняття рішень людиною. Застосовується імітаційне моделювання, метод Монте-Карло та застосовуються генетичні алгоритми (GA). Людина приймає рішення, вибирає ефективні заходи з технічного обслуговування, враховує відповідну інформацію про виробничу систему. Далі на основі математичної моделі, використовуючи імітаційне моделювання Монте-Карло та GA, коректують параметри, для оптимізації та мінімізації витрат.

У науковій роботі [47] розглядається виробнича система безперервного потоку заготовок з двома верстатами, які підлягають профілактичному технічному обслуговуванню залежно від стану та розділені проміжним буфером кінцевої ємності. 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 ураховує коректуваль-

ний коефіцієнт для розрахунку автоматизованих ліній залежно від кількості верстатів у технологічному потоці та враховує залежність ступеня накладених втрат робочого часу від кількості верстатів. Методика дає можливість з високою точністю обчислювати реальні процеси функціонування автоматизованих ліній.

Результатами проведеної роботи дозволяють сформулювати наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження. *Наукова новизна отриманих результатів дослідження* – вперше розроблена методика обчислення накладних втрат робочого часу верстатів автоматизованих ліній деревообробки. Детально здійснено аналіз втрат робочого часу обладнання з метою їх компенсації та підвищення продуктивності. *Практична значущість результатів дослідження* – результати наукового дослідження доцільно застосувати для визначення параметрів роботи автоматизованих ліній деревообробної галузі із урахуванням накладних втрат робочого часу функціонування верстатів.

Виконані дослідження встановлюють вплив втрат робочого часу та стабільність технологічних операцій деревообробного виробництва на ефективність функціонування автоматизованих виробничих систем. Вони дають змогу використовувати нові методи для розрахунку параметрів виробничих систем.

Проведений аналіз дає змогу зробити такі основні **висновки**:

1. Ефективність автоматизованих ліній з послідовним розташуванням верстатів знижується через накладні втрати робочого часу. Запропонована методика розрахунку накладних втрат робочого часу верстатів, дає змогу здійснювати обчислення із запасом до 25 %.

2. Запропоновано використовувати коректувальний коефіцієнт для обчислень, залежно від кількості верстатів в автоматизованій лінії. Новий метод обчислень урахує залежність ступеня накладних втрат робочого часу від кількості верстатів у технологічній лінії. Цей метод є точнішим. Процеси функціонування автоматизованих ліній відтворюються реально. Методика дає достовірні результати обчислень. Методика дозволяє аналізувати якість функціонування автоматизованих ліній деревообробного виробництва.

References

1. **B. Tan and S.B. Gershwin**, (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.
2. **Benny S. Budiman**. (2004). Optimal Capacity Adjustment for Supply Chain Control. Massachusetts Institute of Technology, 106 p.
3. **Dudyuk D.L., Maksymiv V.M., Soroka L.Ya., Orikhovsky R.Ya. et al.** (1996). Imitatsiyne modelyuvannya hnuchkykh avtomatyzovanykh liniy u lisovyrobnychomu kompleksi [Simulation modeling of flexible automated lines in the forestry complex]. Monograph. – Kyiv. – 140 p., (in Ukrainian).
4. **Dudyuk D.L., Mazepa S.S., Mysyk M.M.** (2008). *Гнучке автоматизоване виробництво і роботизовані комплекси* [Flexible automated production and robotic complexes]: Training manual. – Lviv: Magnolia, 278 p. (in Ukrainian).
5. **Dudyuk D.L., Zagvoyska I.D., Maksymiv V.M., Soroka L.Ya.** (1992). *Elementy teoriiy avtomatychnykh liniy* [Elements of the theory of automatic lines]. Textbook. – Kyiv. – 192 p., (in Ukrainian).
6. **Gayda S.V.** (1998). Гнучкі автоматизовані виробництва та робототехніка в деревообробленні: Основи робототехніки / *Hnuchki avtomatyzovani vyrobnytstva ta robototekhnika v derevoobroblenni* [Flexible manufacturing system and robots technology in the Woodworking. Vol.2: Fundamentals of robots technology]. Lviv: UNFU, 145 p
7. **Gayda S.V.** (2007). Дослідження концентрації операцій у сучасному меблевому виробництві / *Doslidzhennya kontsentratsiyi operatsiy u suchasnomu meblevomu vyrobnytstvi* [Research of concentration of operations in modern furniture Production]. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 33:73-79 (in Ukrainian).

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.** (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 of forest complex* 38:212-216 (in Russian).
10. **Gayda S.V.** (2015). Modeling properties of blockboards made of post-consumer wood on the basis of the finite element method. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 41, 39-49. <https://doi.org/10.36930/42154106>
11. **Gayda S.V.** (2016). Research on physical and mechanical characteristics of front blockboards made from post-consumer wood [Дослідження фізико-механічних характеристик фасадних столярних плит із вживаної деревини]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 42: 33-50.
12. **Gayda S.V.** (2016). Технологічні підходи до поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом / *Tekhnolohichni pidkhody do poverkhnevoho ochyshchennya vzhivanoyi derevyiny holkofrezernym instrumentom* [Technological approaches to cleaning of surface of post-consumer wood of needle-milling tools]. *Bulletin of KhNTUA* 178:3-11(in Ukrainian).
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 (in Russian).
14. **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>
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.** (2018). Технологія МДФ-фасадів / *Tekhnolohiyi MDF-Fasadiv* [MDF Facade Technologies]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 44:70-83 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184410>
19. **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).
20. **Gayda S.V.** (2020). Analysis of structures and technologies of manufacture of modern furniture facades. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 54-64. <https://doi.org/10.36930/42204606> (in Ukrainian).
21. **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>
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.** (2013). Resource-saving technologies of recycling of post-consumer wood]. *Scientific Bulletin of NULES of Ukraine: Technology and Energy of agroindustrial complex* 185(2):271-280, (in Ukrainian).
24. **Gayda S.V., Bilyy Ya.M.** (2019). Дослідження технологічних процесів виготовлення ліжок двоспальних різних конструкцій / *Doslidzhennya tekhnolohichnykh protsesiv vyhotovlennya lizhok dvospal'nykh riznykh konstruktsiy* [A investigation of technological processes of making beds of double different designs]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 45:21-31 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42194504>
25. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2013). Технология очистки вторично используемой древесины иглофрезерными станками [The technology of cleaning recycled wood with needle milling machines] // *Actual problems and prospects of the development of LPK: materials II NTK.*, September 9-11, 2013 - Kostroma. - P. 36-39. (in Russian).

26. **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/10.15421/411834>
27. **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>.
28. **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>.
29. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2021). Властивості вживаної деревини як визначальний чинник якості меблевих виробів / *Vlastyvosti vzhyyanoyi derevyyny yak vyznachal'nyy chynnyk yakosti meblevykh vyrobiv* [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). <https://doi.org/10.15421/412135>
30. **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>.
31. **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>
32. **Gayda S.V., Petryshak I.V.** (2020). Study of the influence of breed and grinding modes on the specific productivity of grinding skin. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 46:5-15 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42204601>.
33. **Gayda S.V., Petryshak I.V., Humeniuk Zh.Ya.** (2021). Determination of the influence of rock and grinding modes on the surface roughness of wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 47:5-15 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214701>.
34. **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 (in Ukrainian).
35. **Gayda S.V., Voytovych I.G., Orikhovskyy R.Ya.** (2020). Дослідження технологічних процесів виготовлення ніжок столів обідніх різних конструкцій / *Doslidzhennya tekhnologichnykh protsesiv vyhotovlennya nizhok stoliv obidnikh riznykh konstruktsiy* [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>
36. **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>
37. **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>
38. **Ivanyshyn T.V.** (2011). Методика розрахунку коефіцієнта використання робочого часу двоверстатних автоматизованих ліній з жорстким агрегуванням обладнання [Methodology for calculating the coefficient of utilization of working time of two-machine automated lines with rigid aggregation of equipment]. *Scientific Bulletin of UNFU* 21.6:67-71. (in Ukrainian).
39. **Ivanyshyn T.V.** (2011). Раціональна послідовність верстатів в автоматизованих лініях [Rational sequence of machines in automated lines]. *Scientific Bulletin of UNFU* 21.3:328-332. (in Ukrainian).
40. **Ivanyshyn T.V., Ozymok Yu.I., Kapral Yu.R.** (2022). Формалізація показників ефективності функціонування автоматизованої двоверстатної системи машин з жорстким агрегуванням обладнання [Formalization of performance indicators of the automated two-machine machine system with rigid equipment aggregation]. *Collection of scientific works of the VII International scientific and technical conference TK-22*, 19-21. (in Ukrainian).
41. **Ivanyshyn T.V., Valyukh O.A.** (2012). Формалізація якісних показників функціонування двоверстатної автоматизованої лінії з гнучким між агрегатним зв'язком [Formalization of quality performance indicators of a two-machine automated line with flexible inter-aggregate communication]. *Scientific Bulletin of UNFU* 22.14:370-374. (in Ukrainian).
42. **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.

43. **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*. Vol. 166, October 2017, Pages 61-72, <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.03.034>
44. **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* 44:57-62 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184408> (in Ukrainian).
45. **Orikhovskyy R.Ya.** (2019). Research of reliability and stability of automatic lines in woodworking. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 45:112-116 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42194514> (in Ukrainian).
46. **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> (in Ukrainian).
47. **Shuaichong Wei, Mustapha Nourelfath, Nabil Nahas.** (2023). Analysis of a production line subject to degradation and preventive maintenance *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 230, February 2023, 108906. <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108906>
48. **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, October 2023, 109487. <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109487>
49. **Williams, D.I.** (2008). *Manufacturing systems: an introduction to the technologies.* – Open University Press Milton Keynes, England, 2008 p.
50. **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*. Vol. 180, December 2018, Pages 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.07.008>

UDC 658.527.011.56

*Assoc. prof. R.Ya. Orikhovskyy, PhD;
prof. S.V. Gayda, Doctor of Sciences – UNFU*

Determination of running time losses in automated processing systems of woodworking

A new method of calculating additional losses of running time in automated woodworking processing lines has been developed. This method is used thereafter for the analysis and synthesis of automated lines of woodworking manufacturing. For this purpose, the impact of woodworking manufacturing technological operations stability on the efficiency of the automated processing systems and technological lines functioning has been investigated. Small values of technological operations stability parameters, as well as imposed losses of machine running time are the main reasons for the low efficiency of automated processing systems at the woodworking industry enterprises. Woodworking and wood-base materials processing are significantly influenced by stochastic factors: size and quality characteristics of raw materials, parameters and conditions of technological equipment, manufacturing process organization, external influences. The new method makes it possible to consider the manufacturing process from the perspective of mass service theory and to use simulation modeling for studying the structure and layout of automated lines in order to increase the efficiency and productivity of their work. An important task for researchers is to estimate all components of labor time losses with high accuracy to ensure high manufacturing productivity. The amount of running time losses is affected by the number of consecutively working machines at the line. In automated lines with high stability of the technological equipment functioning, the automated line running time utilization ratio is significantly higher, the efficiency and productivity of woodworking process increases. It has been established that the efficiency of automated lines with sequential placement of machines decreases due to imposed losses of the machine's operation running time, which arise during the operation of the equipment. The impact on the production efficiency of all components of the equipment running time losses has been evaluated in order to reduce their impact on production efficiency and to ensure high productivity of automated woodworking processing lines. Proposed new method uses a correction factor for the calculation of automated lines, depending on the number of machines in the technological flow and takes into account the dependence of the running time-imposed losses degree on the number of machines. Method allows to calculate with higher accuracy the real processes of lines functioning.

Keywords: automated lines of woodworking manufacturing; woodworking equipment and machines; layout of technological lines; technological operations stability parameter; equipment running time losses; efficiency of automated processing systems.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ГНУТТЯ ДЕРЕВИНИ ЯСЕНА

Проаналізовано фактори, що впливають процес гнуття: якість бруска; порода деревини; метод пластифікації; розміри заготовки; вид гнуття; швидкість гнуття; температура деревини; вологість деревини. Обґрунтовано, що спосіб гнуття методом пластифікації в парах аміаку є досить перспективним, але маловивченим, оскільки процес пластифікації аміаком має хімічну природу, і це зумовлює дослідження значення параметрів пластифікації для конкретної породи деревини, щоб уникнути зайвих витрат матеріалів (деревини, аміаку) та електроенергії. Розроблено методику дослідження процесів гнуття, що базується на проведенні експериментів для трьох змінних факторів стосовно впливу їх на якість продукції: товщину матеріалу h , радіус згинання R та тривалість пластифікації заготовок T . За результатами оброблення даних експерименту отримано рівняння регресії, яке описує залежність кількості якісних гнутих заготовок Y_a від товщини матеріалу $h(x_1)$, радіусу згинання $R(x_2)$ та тривалості пластифікації $T(x_3)$. Отримано адекватну математичну модель, що описує відсоток якісних гнутих заготовок деревини ясеня від трьох досліджуваних факторів. Аналіз засвідчує, що при товщині заготовок 6 мм радіус згинання $R(x_2)$ та тривалість пластифікації заготовок $T(x_3)$ не суттєво впливають на кількість якісних заготовок, де цей показник наближається до 100 %. Тоді як за товщини заготовок 20 мм при радіусі згинання $R=30$ мм маємо кількість якісних заготовок на рівні 2,32 %, а при радіусі згинання $R=90$ мм маємо кількість якісних заготовок на рівні 45,47 %. Динаміка збільшення кількості якісних заготовок при зростанні тривалості пластифікації для розглянутих умов відповідно становить 9,41 % та 10,39 %. Визначено оптимальні умови ($h = 6$ мм, $R = 30$ мм, $T = 12$ год), при яких спостерігається найбільший відсоток якісних деталей $Y_{\text{max}} = 99,441$ %. Підтверджено доцільність використання відповідної концентрації аміаку для пластифікації під час виготовлення гнутих заготовок, але для отримання високої кількості якісних заготовок необхідно дотримуватись запропонованих рекомендацій. Розроблено практичні рекомендації, що базуються на методі отриманні гнутих заготовок шляхом проведення пластифікації в 35% розчині аміаку, що забезпечує максимальний вихід якісних заготовок при товщині 6 мм та радіусу згину 30 мм.

Ключові слова: деревина, вживана деревина, меблеві заготовки, гнуття, пластифікація, пресування, ясен, рівняння регресії, модель, деформативність, технологія.

Актуальність досліджень процесів гнуття заготовок деревини різних порід. Актуальність досліджень процесів гнуття заготовок деревини різних порід є досить високою, оскільки полягає у підвищенні якості продукції – розумінні властивостей різних порід стосовно уникання дефектів; оптимізації технологічних процесів – розробленні більш ефективних методів виробництва; застосуванні інновацій у виробництві – використанні спеціальних парових або гідравлічних установок, лазерного нагрівання; збільшенні міцності конструкцій, оскільки гнуті дерев'яні конструкції можуть мати більшу міцність порівняно з прямими елементами, що актуально для будівництва та машинобудування [1, 2, 4, 39, 50].

Дослідження впливу товщини матеріалу, радіусу згинання та тривалості пластифікації, зокрема деревини ясеня в процесах гнуття на кількість якісних заготовок є актуальним з кількох причин:

- Оптимізація виробничих процесів, оскільки розуміння того, як товщина матеріалу, радіус згинання та тривалість пластифікації впливають на якість заготовок, дозволяє налаштовувати

¹ Грицак Степан Степанович – 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, +38-097-477-17-39. E-mail: Hrytsak.Stepan@nltu.lviv.ua

технологічні параметри для досягнення найкращих результатів. Це особливо важливо для масового виробництва, де кожна невідповідність стандартам може призводити до значних втрат. Зменшення дефектів, так як яшень, як і, інші породи деревини, схильний до виникнення дефектів під час гнуття, таких як тріщини або розшарування. Дослідження оптимальних умов процесу допоможе зменшити кількість браку, що напряду впливає на економічну ефективність виробництва. Покращення механічних властивостей, оскільки правильний вибір товщини матеріалу, радіусу згинання та часу пластифікації може покращити механічні властивості кінцевих виробів, підвищуючи їхню міцність та довговічність [9, 27, 28, 44, 49, 50]. Це важливо для застосувань, де на конструкції можуть діяти значні навантаження.

- Ефективне використання ресурсів, так як оптимізація процесів гнуття дозволяє більш ефективно використовувати матеріал, зменшуючи кількість відходів. Це сприяє раціональному використанню природних ресурсів і зменшенню витрат. Інноваційні рішення у дизайні, оскільки вивчення впливу технологічних параметрів на якість заготовок відкриває можливості для створення нових форм і конструкцій у меблевій промисловості, дизайні інтер'єрів та інших галузях. Покращення екологічності виробництва, так як зменшення кількості браку та оптимізація процесів гнуття сприяють зниженню загального впливу на навколишнє середовище, що є важливим фактором у сучасному виробництві [17, 18, 19, 20, 29, 30, 43, 44, 48].

- Адаптація до нових матеріалів і технологій, оскільки такі дослідження можуть сприяти адаптації традиційних технологій до нових матеріалів або комбінування деревини ясеня з іншими матеріалами, що відкриває нові можливості для інновацій у продуктах [5, 10, 13, 14].

Таким чином, актуальність цих досліджень обумовлена потребою у підвищенні ефективності, якості та економічності виробничих процесів, а також у покращенні властивостей кінцевих продуктів. Загалом, такі дослідження спрямовані на підвищення якості та ефективності виробничих процесів, що має важливе значення як для виробників, так і для кінцевих споживачів.

Проблема досліджень гнуття деревини ясеня різного походження та різного сорту. Дослідження гнуття деревини ясеня різного походження та різного сорту стикається з низкою проблем, які можуть впливати на результати та їх інтерпретацію. Основні проблеми включають:

- Яшень різного походження та сорту може значно відрізнятися за фізико-механічними властивостями, такими як щільність, вологість, вміст смол, структура волокон, що впливає на поведінку деревини під час гнуття. Це ускладнює стандартизацію процесів і вимагає індивідуального підходу до кожної партії матеріалу. Якість ясеня може значно змінюватись залежно від сорту, який визначає наявність сучків, тріщин, заболоні тощо. Деревина нижчого сорту зазвичай має більше вад, що збільшує ризик виникнення дефектів під час гнуття [43, 49, 50].

- Деревина є природним матеріалом, схильним до змін під впливом зовнішніх факторів (температура, вологість). Це може призводити до варіацій у результатах гнуття навіть у межах однієї партії матеріалу, що ускладнює досягнення стабільної якості продукції. Підбір оптимальних параметрів гнуття (температура, час пластифікації, швидкість згинання) може бути складним через змінність властивостей деревини різного походження. Це потребує великої кількості експериментів для встановлення найкращих умов для кожного типу деревини.

- Через значну варіативність деревини виникають труднощі у розробці універсальних стандартів для процесів гнуття. Це створює проблеми у забезпеченні стабільної якості продукції на різних виробництвах. Існуючі теоретичні моделі часто не враховують всіх властивостей деревини, таких як природні дефекти чи внутрішня напруга. Це може призводити до розбіжностей між очікуваними і реальними результатами. Походження деревини (регіон росту, кліматичні умови) може впливати на її властивості [7, 36, 42, 44, 49, 50].

- Деревина з різних регіонів може мати різну щільність, вологість, а також інші специфічні особливості, що вимагає врахування цих факторів при дослідженні гнуття. Через значну кількість змінних факторів результати досліджень гнуття можуть бути складними для відтворення, що ускладнює процес розробки універсальних рекомендацій та інструкцій для виробництва [12, 15, 23, 25, 34, 45, 46].

Стосовно дослідження впливу товщини матеріалу, радіусу згинання та тривалості пластифікації деревини ясена на кількість якісних заготовок у процесах гнуття стикається з кількома основними проблемами:

- Товщина матеріалу, радіус згинання та тривалість пластифікації впливають на результати не окремо, а в комплексі. Це ускладнює визначення оптимальних умов, оскільки зміна одного параметра може суттєво вплинути на поведінку деревини в процесі гнуття.

- Навіть при контрольованих умовах, процес гнуття деревини може бути нестабільним через природну варіативність властивостей деревини ясена, таких як щільність, вологість та структура волокон [49]. Це призводить до труднощів у відтворюваності результатів і збільшує частку дефектних заготовок. Оцінка впливу кожного з параметрів (товщини, радіусу згинання, тривалості пластифікації) на якість заготовок може бути утрудненою через складність точного вимірювання та контролю всіх умов процесу. Через різноманіття порід ясена, їхнього походження та сортності, універсальні рекомендації щодо товщини матеріалу, радіусу згинання та тривалості пластифікації можуть бути неточними або непридатними для різних умов. Це вимагає індивідуальної настройки процесів для кожного конкретного випадку.

- Існуючі теоретичні моделі, які використовуються для прогнозування результатів гнуття, часто не враховують усіх можливих змінних, таких як внутрішні напруги в деревині, наявність сучків, тощо. Це може призводити до невідповідності між теоретичними прогнозами і реальними результатами. Тривалість і умови пластифікації (наприклад, парування або використання хімічних розчинів) суттєво впливають на здатність деревини до згинання. Недостатня або надмірна пластифікація може призвести до збільшення кількості дефектів, таких як розтріскування чи ламкість заготовок [1, 2, 38, 39, 40]. При неправильно підібраних параметрах товщини, радіусу або часу пластифікації існує високий ризик утворення дефектів, таких як тріщини чи нерівномірне згинання, що негативно впливає на кількість якісних заготовок.

- Постійне тестування різних параметрів гнуття для визначення оптимальних умов є ресурсозатратним процесом, що може значно підвищувати загальну вартість виробництва.

Таким чином, ці проблеми вимагають детального вивчення та адаптації технологічних процесів під специфічні властивості деревини кожного сорту та походження, а також розробки більш точних моделей, що враховують усі можливі варіації матеріалу.

Аналіз літературних джерел. Аналіз літературних джерел стосовно процесів гнуття деревини різного походження, різних порід, та різними методами показує, що ця тема є добре дослідженою, але має свої особливості, які варіюються залежно від породи деревини, методу гнуття та умов обробки. Основні аспекти, які висвітлюються у літературі, включають:

- Дослідження показують, що різні породи деревини мають різні властивості, що впливають на їх здатність до гнуття. Наприклад, ясен, бук, дуб та клен зазвичай розглядаються як кращі для гнуття через їхню здатність витримувати значні деформації без тріщин. Породи з менш щільною структурою, такі як сосна чи ялина, менш придатні для гнуття, оскільки мають меншу міцність на злам і більше схильні до розтріскування [1, 2, 3, 9, 18, 32, 38, 39, 40, 49].

- Походження деревини (первинна або вживана) впливає на її властивості, такі як щільність, вологість та вміст смол, що, в свою чергу, впливає на здатність деревини до гнуття [6-13, 23-27, 31-33, 36]. Деревина, вирощена в різних регіонах, може мати різні характеристики, навіть якщо належить до однієї породи. Це ускладнює стандартизацію процесів гнуття.

- Аналіз методів гнуття, зокрема парове гнуття ефективно для багатьох порід, але потребує ретельного контролю часу і температури; гнуття з використанням хімічних реагентів - метод менш екологічний, але може бути ефективним для порід, що важко гнуться; гідравлічне гнуття – підходить для товстих і жорстких заготовок, але ризик тріщин може бути високим без попередньої обробки пластифікаторами; мікрохвильове гнуття – інноваційний метод, що зменшує час обробки і дозволяє досягти високої якості згинання.

- Товщина деревини, радіус згинання і тривалість пластифікації мають значний вплив на кінцевий результат. Виявлено, що тонші заготовки гнуться легше, але можуть бути менш міц-

ними. Великий радіус згинання зменшує ризик дефектів, тоді як малий радіус підвищує вимоги до якості обробки та пластифікації [1, 2, 38-40, 50]. Тривалість пластифікації також критично впливає на якість. Надмірна пластифікація може призвести до пошкодження структури деревини, тоді як недостатня — до тріщин і ламкості.

Аналіз літератури показує, що процеси гнуття деревини є складними і залежать від багатьох факторів. Однак, завдяки постійному розвитку технологій і методів досліджень, досягається все більш високий рівень контролю та якості у виробництві гнутих дерев'яних виробів.

Особливості гнуття вживаної деревини (ВЖД). Гнуття ВЖД має свої особливості та виклики, які відрізняються від роботи з новою деревиною. Цей процес стає актуальним у контексті екологічного будівництва [30, 35, 39, 40], відновлення меблів та повторного використання матеріалів [5, 10, 13, 14, 16, 22, 24, 26, 33, 41]. Ось основні особливості, з якими стикаються при гнутті ВЖД:

- ВЖД може мати мікротріщини, зношену поверхню, зміни в щільності та вологості через час, які ускладнюють процес пресування у різних технологіях перероблення [3, 6, 8, 43, 47, 50]. Зміни у структурі можуть знижувати еластичність матеріалу, роблячи його більш ламким і менш піддатливим до згинання без пошкоджень.

- ВЖД може містити залишкові внутрішні напруження, що виникли в результаті попередніх механічних навантажень, впливу навколишнього середовища або змін в умовах експлуатації. Це може призводити до раптових тріщин чи зламів під час гнуття.

- ВЖД часто вже пройшла через певні процеси обробки: фарбування, лакування, просочення. Ці обробки можуть впливати на здатність деревини до пластифікації та згинання. Деякі хімічні речовини, використані раніше, можуть ускладнювати процеси пластифікації або взаємодіяти з новими матеріалами, які застосовуються під час гнуття.

- ВЖД може мати невизначене походження, сорт та вид породи, що ускладнює вибір правильних умов для гнуття, таких як температура і тривалість пластифікації. Відсутність точних даних про матеріал може призвести до неконтрольованих результатів.

- ВЖД часто має нестабільний рівень вологості, який може бути або занадто низьким (сухість) або занадто високим (вбирання вологи з навколишнього середовища). Обидва ці стани можуть негативно вплинути на процес гнуття, оскільки потрібен оптимальний рівень вологості для пластифікації. Часто ВЖД має механічні пошкодження, такі як подряпини, вм'ятини, злами чи навіть незначні тріщини. Ці дефекти можуть значно впливати на здатність матеріалу до гнуття, збільшуючи ймовірність додаткових пошкоджень під час процесу.

- Деревина, яка була у вжитку, може бути неоднорідною по своїй структурі через механічні пошкодження, гниття або вплив інших зовнішніх факторів. Це ускладнює отримання якісних заготовок [3, 4, 21, 35, 37, 39, 50], а тим більше контроль процесу гнуття, оскільки деякі частини заготовки можуть піддаватись деформації краще, ніж інші.

- Для ВЖД можуть бути необхідні спеціальні методи, такі як довша пластифікація, використання додаткових пластифікаторів, парове гнуття з попередньою хімічною обробкою або більш м'які методи згинання, щоб уникнути додаткових пошкоджень. Важливо ретельно перевіряти вживану деревину на наявність сторонніх включень, наприклад, цвяхів чи інших металевих предметів, які можуть створити небезпеку під час механічної обробки або гнуття.

- Використання ВЖД може бути екологічно виправданим і економічно вигідним, але потребує додаткових зусиль для забезпечення її якості та довговічності після обробки [9, 11, 27, 28, 31, 44]. Це робить дослідження та розробку технологій гнуття ВЖД важливою задачею.

Загалом, гнуття ВЖД вимагає індивідуального підходу та ретельної підготовки матеріалу, включаючи оцінку його стану, підбір технологічних параметрів і використання спеціальних методів для досягнення якісного результату.

Об'єктом досліджень є встановлення впливу товщини матеріалу, радіусу згинання та тривалості пластифікації деревини ясена в процесах гнуття на кількість якісних заготовок. **Предметом досліджень** є заготовки деревини ясена.

Метою роботи є встановлення закономірностей впливу товщини матеріалу, радіусу згинання та тривалості пластифікації деревини ясена на кількість якісних гнутих заготовок.

Методика досліджень. Для досягнення мети необхідно розв'язати такі задачі: проаналізувати область експерименту; вибрати змінні фактори та встановити межі їх змін; спланувати пошуковий експеримент, здійснити статистичний аналіз даних, перевірити нормальність розподілу даних і визначити необхідну кількість дубльованих спостережень; спланувати та виконати експериментальні дослідження згідно матриці планування для трьох змінних факторів, побудувати математичну модель;

Постійними факторами у даному експерименті є: порода деревини; температура і вологість в приміщенні; вид просочувального розчину; метод пластифікації; концентрація аміаку; напрям волокон деревини; ширина заготовок. Температура в цеху зафіксована на стабільному рівні і згідно санітарно-гігієнічних норм становить 18 °С. Порода деревини, пористість, хімічний склад, твердість, якість – визначають на початку досліджень і звичайно ці параметри повинні залишатися незмінними до кінця її завершення. В даному випадку деревина ясена. Метод пластифікації – це безперечно основний із самих важливих факторів впливу. В якості пластифікатора використовується 35% розчин аміаку. Концентрація аміаку під час проведення дослідів, підтримувалася постійною. Ширина заготовок – 15 мм.

У роботі були задіяні дві установки: лабораторна – в якій проводилася пластифікація брусків, та для гнуття – де проводився процес надання бруску криволінійної форми. Схема лабораторної установки для пластифікації деревини була представлена у вигляді прямокутної герметичної посудини. Різні породи деревини мають різні допустимі радіуси згинання. Із збільшенням товщини збільшується відсоток браку зігнутих заготовок. Неякісно підібраний матеріал при гнуті буде причиною сколів, тріщин і т. д. Чим більший радіус згинання, тим більший відсоток якісних заготовок. Із збільшенням тривалості пластифікації заготовок перед гнуттям, зменшується відсоток браку зігнутих заготовок.

У результаті досліджень явища з літературних джерел, практичного досвіду і теоретичного аналізу досліджень було вибрано область експерименту (табл. 1). Для дослідження процесів гнуття вибираємо три фактори впливу на якість продукції: товщину матеріалу 6, 13, 20 мм (**h**), радіус згинання 30, 60, 90 мм (**R**) та тривалість пластифікації заготовок 12, 36, 60 мм (**T**).

Проводимо кодування змінних факторів: зберігаючи послідовність, кожному фактору товщина бруска **h**, радіус гнуття бруска **R** і тривалість пластифікації **T** присвоюємо кодоване значення, відповідно, X_1 , X_2 , X_3 . З метою спрощення записів у методичній сітці дослідів приймаємо позначення верхньої межі фактора, середнього рівня та нижньої межі, відповідно -1, 0, +1.

Таблиця 1. Матриця планування для трьох змінних факторів

Назва фактору		Фактор	Код	Натуральні значення фактору			Кодовані значення фактору			
				нижнє	основне	верхнє	нижнє	основне	верхнє	
Товщина	мм	h	x_1	6	13	20	-1	0	1	7
Радіус	мм	R	x_2	30	60	90	-1	0	1	30
Тривалість пластифікації	год	T	x_3	12	36	60	-1	0	1	24

Особливу складність представляє вибір функції відгуку. Вона має бути чисельною величиною. При аналізі якості гнуття такою величиною може бути відсоток якісних заготовок. Отримані методом гнуття заготовки умовно можна розділити на три групи: якісні Y_1 , умовно якісні Y_2 , браковані Y_3 . Кожен дослід дублювався 5 разів. Якісна це заготовка без тріщин з гладкою поверхнею. Умовно якісна з тріщинами до 2 – 3 мм в ширину і до 30 мм по довжині, також сюди відносяться заготовки з косошаром в зв'язку з неякісним підбором деревини. Браковані це заготовки, які в процесі згинання розколювалися поперек волокон. Якщо Y_1 – процент якісних, Y_2 – умовно якісних, Y_3 – бракованих, то вихідним параметром був $Y_{\text{я}}$, як середнє значення суми якісних і умовно якісних заготовок.

Результати (Results). Згідно методики досліджень було виготовлено експериментальні бруски із ясеня та виконано дослідження для порівняльного аналізу шляхом встановлення максимальної кількості якісних заготовок $Y_{\text{я}}$ (рис. 1).



Рис. 1. Гнуті взірці деревини ясеня

Результати експериментальних випробувань на встановлення впливу товщини матеріалу h , радіусу згинання R та тривалості пластифікації заготовок T на отримання максимальної кількості якісних заготовок $Y_{\text{я}}$ із деревини ясеня представлено у табл. 2. Проводимо обробку результатів, яка полягає у визначенні дисперсії і перевірці математичної моделі на адекватність. Для кожної j -ої вибірки знаходимо середні значення та дисперсії.

Таблиця 2. Розрахунок середніх значень та дисперсії

№	Результати u_{ij} досліджень при гнутті ясеня, МПа					Середнє значення в j -ій вибірці	Дисперсія в j -ій вибірці
	u_{1j}	u_{2j}	u_{3j}	u_{4j}	u_{5j}		
1	2	3	4	5	6	7	8
9.	100	99	100	98	99	99,20	0,70
10	1	1	1	2	1	1,20	0,20
11	100	100	99	97	98	98,80	1,70
12	45	43	50	48	47	46,60	7,30
13	100	99	100	97	99	99,00	1,50
14	15	16	17	18	19	17,00	2,50
15	100	100	99	99	97	99,00	1,50
16	51	55	53	54	56	53,80	3,70
	Сума					514,60	19,10

$$\text{Дисперсію відтворюваності: } S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{N}; \quad (1)$$

Підставивши дані у формулу 1 отримаємо значення дисперсії відтворюваності: $S_y^2 = 19,10/8=2,3875$. Отримано коефіцієнти та їх значимість. Для визначення коефіцієнтів рівняння було використано методику статистичної обробки даних і розраховано коефіцієнти рівняння регресії (табл. 3).

Таблиця 3. Розрахунок коефіцієнтів регресії математичної моделі

Коефіцієнт	Величина коефіцієнта	t(q,f _y) S{b _i }	Висновок	Межі достовірного інтервалу	
				b _i – t _{табл} S{b _i }	b _i + t _{табл} S{b _i }
b ₀	64,325	0,4984	Значуще	63,8266	64,8234
b ₁	-34,675		Значуще	-35,1734	-34,1766
b ₂	10,225		Значуще	9,7266	10,7234
b ₁₁	2,875		Значуще	2,3766	3,3734
b ₂₂	10,325		Значуще	9,8266	10,8234
b ₁₂	2,875		Значуще	2,3766	3,3734

$$\text{Для дисперсії адекватності: } \sum_{j=1}^8 (\bar{y}_j - y_j^p)^2 \quad (2)$$

Таблиця 3. Розрахунок дисперсії адекватності

№ досліду	$\bar{y}_j$	y_j^p	$(\bar{y}_j - y_j^p)^2$
9.	99,2	98,1	1,3
10.	1,2	2,325	1,265625
11.	98,8	99,9	1,3
12.	46,6	45,475	1,265625
13.	99,0	100,1	1,3
14.	17	15,875	1,265625
15.	99,0	97,9	1,3
16.	53,8	54,925	1,265625
Сума			10,125

$$\text{Визначаємо дисперсію адекватності: } S_{ad}^2 = \frac{n}{f_{ad}} \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - y_j^p)^2 \quad (3)$$

$$S_{ad}^2 = 5/(8-7) \times 10,125 = 50,625.$$

$$\text{Розрахункове значення критерію Фішера: } F_{роз.} = \frac{S_{бильша}^2}{S_{менша}^2} = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \quad (4)$$

Підставивши дані у формулу 4 отримаємо розрахункове значення критерію Фішера $F_{роз.}$: $F_{роз.} = 50,625/2,3875=21,2042$. Табличне значення критерію Фішера $F_{табл.}$, яке залежить від рівня значимості $q=5\%$, числа ступенів вільності дисперсії адекватності $f_{ad}=8-7=1$ та числа належних оцінок дисперсії відтворюваності $f_y=8*(5-1)=32$: $F_{табл.}=252$. Оскільки, $21,2042 < 252$ ($F_{роз.} < F_{табл.}$), тоді регресійна модель адекватна. За результатами оброблення даних експерименту отримано рівняння регресії, яке описує залежність кількості якісних заготовок Y_j від товщини матеріалу $h(x_1)$, радіусу згинання $R(x_2)$ та тривалості пластифікації заготовок $T(x_3)$.

Одержана математична модель – рівняння регресії в нормалізованих значеннях змінних факторів має вигляд:

$$y=64,325 - 34,675x_1 + 10,225x_2 + 2,875x_3 + 10,325x_1x_2 + 2,875 x_1x_3 - 1,025 x_1x_2$$

Запис математичної моделі – рівняння регресії в натуральних значеннях змінних факторів такий:

$$Y_{\text{я}} = 147,243 - 8,5196 h - 0,2 R - 0,0173 T + 0,04917 Rh + 0,017113 Th - 0,001423611 RT.$$

Оскільки вплив факторів і взаємодій на функцію відгуку добре аналізувати на основі графіків, побудованих за рівнянням регресії, то побудуємо три групи графіків залежності вихідної величини y від фактору X_1 , X_2 , X_3 при різних фіксованих значеннях інших факторів.

Таким чином отримаємо дев'ять графіків залежності y в натуральних позначеннях. На основі отриманої математичної моделі розглянемо вплив кожного з факторів на відсоток якісних заготовок.

Графічна інтерпретація залежностей на рис. 2, рис. 3 та рис. 4.

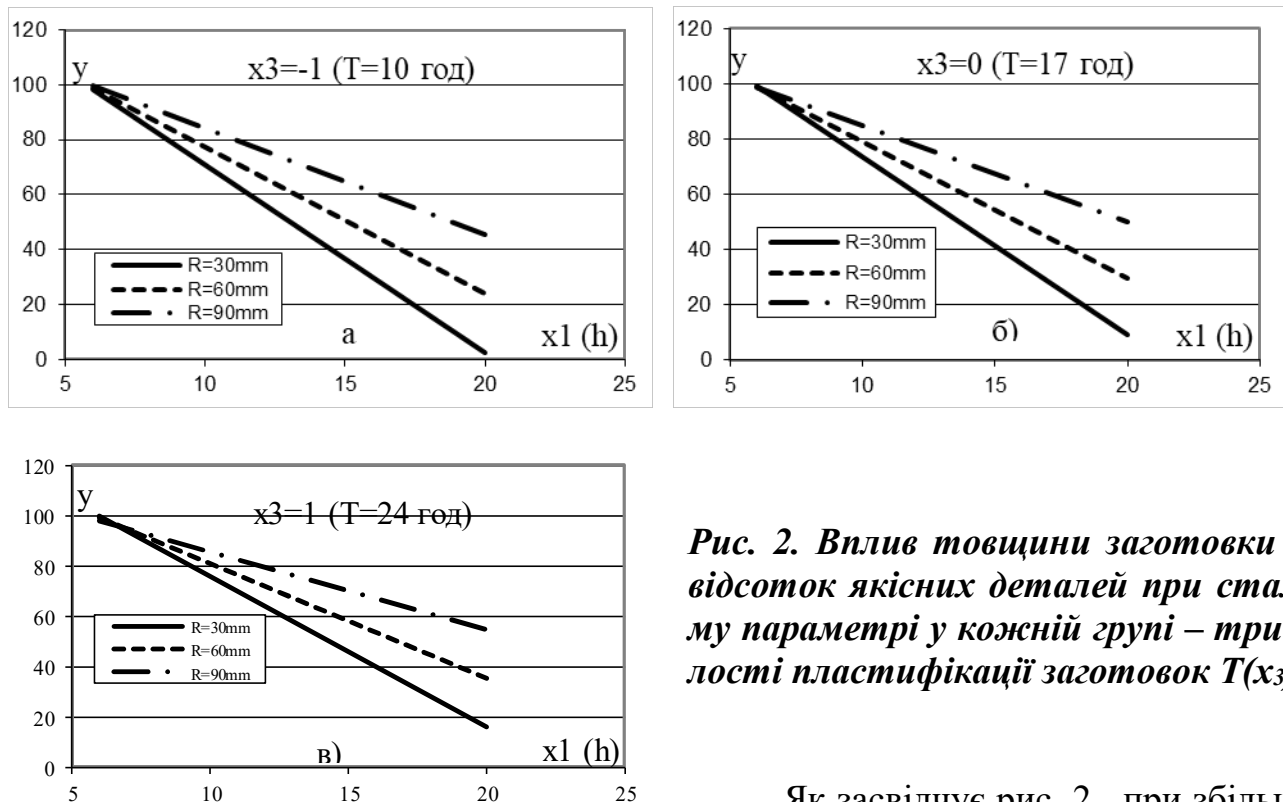


Рис. 2. Вплив товщини заготовки на відсоток якісних деталей при сталому параметрі у кожній групі – тривалості пластифікації заготовок $T(x_3)$

Як засвідчує рис. 2. при збільшенні товщини матеріалу частка якісних деталей зменшується. Також при збільшенні радіусу кількість якісних деталей також зростає.

Аналіз засвідчує, що при товщині заготовок 6 мм радіус згинання $R(x_2)$ та тривалість пластифікації заготовок $T(x_3)$ не суттєво впливають на кількість якісних заготовок, а цей показник наближається до 100 %. Тоді як за товщини заготовок 20 мм при радіусі згинання $R=30$ мм маємо кількість якісних заготовок на рівні 2,32 %, а при радіусі згинання $R=90$ мм маємо кількість якісних заготовок на рівні 45,47 %. Динаміка збільшення при зростанні тривалості пластифікації відповідно становить 9,41 % та 10,39 %.

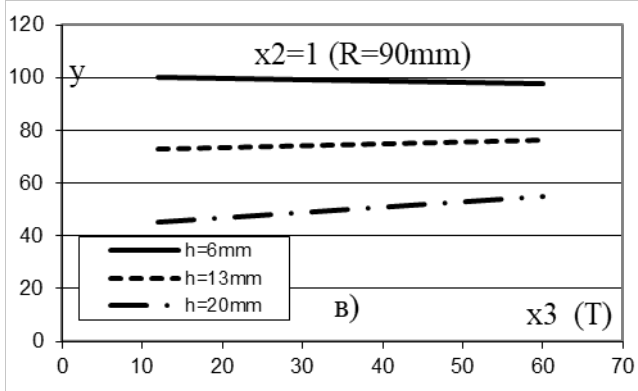
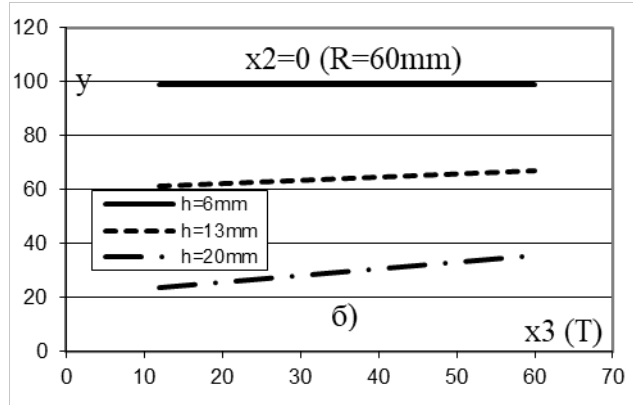
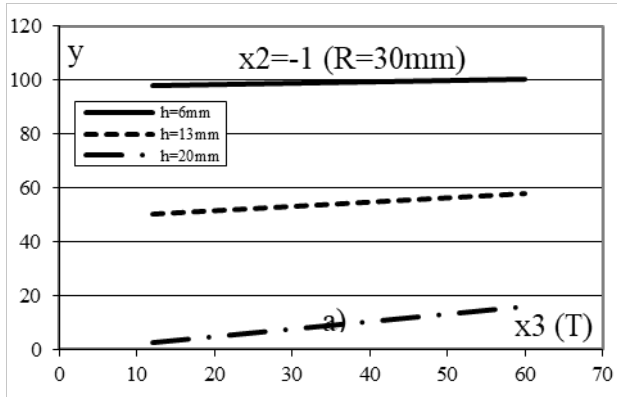


Рис. 3. Вплив тривалості пластифікації заготовок на відсоток якісних деталей при сталому параметрі у кожній групі – радіусу згинання $R(x_2)$

З рис. 3 випливає, що при збільшенні тривалості пластифікації частка якісних деталей зростає для товстіших заготовок.

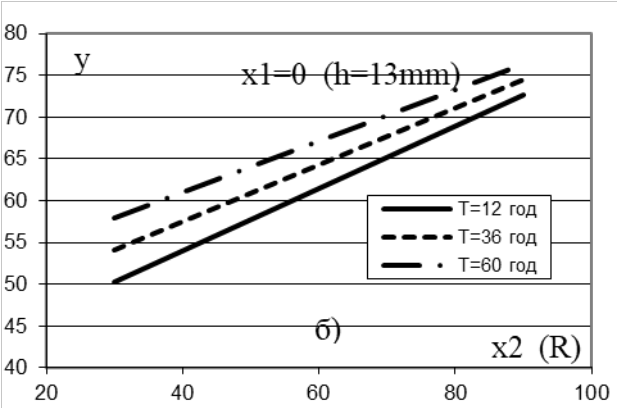
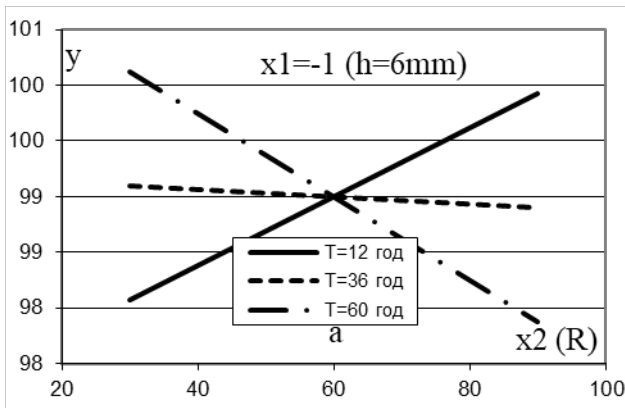


Рис. 4. Вплив радіусу згинання на відсоток якісних деталей при сталому параметрі у кожній групі – товщини матеріалу $h(x_1)$

З рис. 4 випливає, що при збільшенні радіусу згинання відсоток якісних заготовок збільшується, а відповідно при збільшенні товщини деталей відсоток якісних

деталей зменшується.

Дослідження процесів гнуття деревини в парах аміаку є перспективним напрямом в області матеріалознавства і деревообробки. Вплив парів аміаку на деревину значно знижує її жорсткість, дозволяючи отримувати складні вигнуті форми без розтріскування або інших дефектів.

Перспективні напрями досліджень процесів гнуття деревини ясена та інших порід в парах аміаку:

- Аналіз, як різні породи деревини (ясен, дуб, бук) реагують на обробку параами аміаку. Дослідження оптимальних умов (температура, концентрація аміаку, час обробки) для кожної породи для досягнення максимального ефекту гнуття без пошкодження структури деревини.
- Оцінка змін у міцності, жорсткості та еластичності деревини після обробки параами аміаку. Визначення, як ці зміни впливають на довговічність і стабільність кінцевих виробів. Дослідження хімічних реакцій, які відбуваються між параами аміаку та компонентами деревини (лігнін, целюлоза). Вплив аміаку на колір, текстуру і можливість фарбування обробленої деревини.
- Розробка математичних моделей і симуляцій процесу гнуття для передбачення оптимальних параметрів. Вивчення взаємодії параметрів обробки (температура, тиск, час) та геометричних характеристик виробів (радіус гнуття, товщина матеріалу).
- Оцінка екологічного впливу використання парів аміаку в деревообробці. Розробка методів зменшення викидів аміаку та забезпечення безпечних умов праці для працівників.
- Використання альтернативних джерел аміаку або комбінацій хімічних речовин для покращення результатів гнуття. Інтеграція сучасних технологій (наприклад, 3D-друк для створення прес-форм) для підвищення точності процесу.

Ці напрямки досліджень можуть суттєво розширити можливості використання деревини в інноваційних конструкціях та дизайні, а також покращити ефективність і екологічність процесу гнуття деревини.

Висновки.

1. Проаналізовано фактори, що впливають процес гнуття: якість бруска; порода деревини; метод пластифікації; розміри заготовки; вид гнуття; швидкість гнуття; вологість деревини.
2. Обґрунтовано, що спосіб гнуття методом пластифікації в парах аміаку є досить перспективним, але маловивченим, оскільки процес пластифікації аміаком має хімічну природу, і це зумовлює дослідження значення параметрів пластифікації для конкретної породи деревини, щоб уникнути зайвих витрат матеріалів (деревини, аміаку) та електроенергії.
3. Розроблено методику дослідження процесів гнуття, що базується на проведенні експериментів для трьох змінних факторів стосовно впливу їх на якість продукції: товщину 6, 13, 20 мм (h), радіус згинання 30, 60, 90 мм (R) та тривалість пластифікації заготовок 12, 36, 60 мм (T).
4. За результатами оброблення даних експерименту отримано рівняння регресії, яке описує залежність кількості якісних гнутих заготовок Y_a від товщини матеріалу $h(x_1)$, радіусу згинання $R(x_2)$ та тривалості пластифікації $T(x_3)$. Отримано адекватну математичну модель, що описує відсоток якісних гнутих заготовок деревини ясен від трьох досліджуваних факторів.
5. Аналіз засвідчує, що при товщині заготовок 6 мм радіус згинання $R(x_2)$ та тривалість пластифікації заготовок $T(x_3)$ не суттєво впливають на кількість якісних гнутих заготовок, де цей показник наближається до 100 %. Тоді як за товщини заготовок 20 мм при радіусі згинання $R=30$ мм маємо кількість якісних заготовок на рівні 2,32 %, а при радіусі згинання $R=90$ мм маємо кількість якісних заготовок на рівні 45,47 %. Динаміка збільшення кількості якісних заготовок при зростанні часу пластифікації для розглянутих умов становить 9,41 % та 10,39 %.
6. Визначено оптимальні умови ($h = 6$ мм, $R = 30$ мм, $T = 12$ год), при яких спостерігається найбільший відсоток якісних деталей $Y_{\text{яmax}} = 99,441$ %.
7. Підтверджено доцільність використання відповідної концентрації аміаку для пластифікації під час виготовлення гнутих заготовок, але для отримання високої кількості якісних заготовок необхідно дотримуватись запропонованих практичних рекомендацій.
8. Розроблено практичні рекомендації, що базуються на методі отриманні гнутих заготовок шляхом проведення пластифікації в 35% розчині аміаку, що забезпечує максимальний вихід якісних заготовок при товщині 6 мм та радіусу згину 30 мм.

References

1. **Arnold, M.** (2010): Effect of moisture on the bending properties of thermally modified beech and spruce. *J Mater Sci* 45, 669-680. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3984-8>
2. **Bektaş, I., Güler, C., Baştürk, M.A.,** (2002): Principal mechanical properties of eastern beech wood (*Fagus orientalis* Lipsky) naturally grown in Andirin northeastern Mediterranean region of Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 26: 147-154.

3. **Gayda S.V.** (2000): Матеріали для виготовлення виробів з деревини / Materials for the Production of wood Products. Lviv: BMC. – 160 p. (in Ukr.).
4. **Gayda S.V.** (2015). Modeling properties of blockboards made of post-consumer wood on the basis of the finite element method. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 41, 39-49. <https://doi.org/10.36930/42154106>
5. **Gayda S.V.** (2007). Research of concentration of operations is in modern furniture production // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. – Lviv. – 33:73-79. (in Ukrainian.).
6. **Gayda S.V.** (2012). Production techniques and properties of fuel pellets produced from post-consumer wood // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. – Lviv: UNFU. – 38: 112-150.
7. **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.
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.** (2015). Investigation of physical and mechanical properties of post-consumer wood (PCW). *Actual problems of forest complex* 43:175-179 (in Russian).
10. **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 (in Russian).
11. **Gayda S.V.** (2017): Комплексні дослідження зміни пружних властивостей вживаної деревини ялиці з віком / *Kompleksni doslidzhennya zminy pruzhnykh vlastyvostey vzhivanoyi derevyny yalytsi z vikom* [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>
12. **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. <https://doi.org/10.36930/42174301> (in Ukrainian).
13. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). *Bulletin of KhNTUA* 197:3-9, (in Ukrainian).
14. **Gayda S.V.** (2018). Технологія МДФ-фасадів / *Tekhnolohiyi MDF-Fasadiv* [MDF Facade Technologies]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 44:70-83 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184410>
15. **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).
16. **Gayda S.V.** (2020). Analysis of structures and technologies of manufacture of modern furniture facades. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 54-64. <https://doi.org/10.36930/42204606> (in Ukrainian).
17. **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).
18. **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>
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.** (2024). Analysis of the trend of the main indicators of the wood processing industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 4-15 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245001>
21. **Gayda S.V.** (2013). Resource-saving technologies of recycling of post-consumer wood]. *Scientific Bulletin of NULES of Ukraine: Technology and Energy of agroindustrial complex* 185(2):271-280, (in Ukrainian).
22. **Gayda S.V., Ilkiv M.M.** (2021) : Дослідження технологічних процесів виготовлення меблевих фасадів з масивної деревини // *Doslidzhennya tekhnolohichnykh protsesiv vyhotovlennya meblevykh fasadiv z masyvnoyi derevyny*. [Research of technological processes of manufacture of meble facades from solid wood]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 47:22-33, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214703>
23. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2013). Технология очистки вторично используемой древесины иглофрезерными станками [The technology of cleaning recycled wood with needle milling machines] // *Actual problems and prospects of the development of LPK: materials II NTK.*, Sept. 9-11, 2013 – Kostroma. – P. 36-39.

24. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2018). Shape stability as a quality criterion for PCW-made blockboards. Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, 17, 185-192. <https://doi.org/10.15421/411834> (in Ukrainian)
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. <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. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.352.10>.
27. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2021). Властивості вживаної деревини як визначальний чинник якості меблевих виробів / *Vlastyvosti vzhuvanoyi derevyyny yak vyznachal'nyy chynnyk yakosti meblevykh vyrobiv* [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). <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.** (2016): A investigation of form of stability of variously designed blockboards made of post-consumer wood. *ProLigno* 12(1):22-31.
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. <https://doi.org/10.36930/42234903> (in Ukrainian).
32. **Гайда С.В., Максимів В.М., Кійко О.А., Ференц О.Б.** Залишки деревини та деревина після споживання. Класифікація. Терміни та визначення / Договір № 08.24-11-1 : проект міжнародного стандарту ISO. – Львів: НЛТУ України. – 2013. – 53 с.
33. **Gayda S.V., Bilyy Ya.M.** (2016). The investigation of the shape stability of glued panels made of post-consumer wood. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 42, 69-79. <https://doi.org/10.36930/42164211> (in Ukrainian).
34. **Gayda S.V., Petryshak I.V.** (2020). Study of the influence of breed and grinding modes on the specific productivity of grinding skin. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 46, 5-15. <https://doi.org/10.36930/42204601> (in Ukrainian).
35. **Gayda S.V., Salapak L.V., Lesiv L.E.** (2021). Determination of an efficient technological process of manufacturing various support elements for functional surfaces. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 47: 58-72, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214708>
36. **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 (in Russian).
37. **Gayda S.V., Voytovych I.G., Orikhovskyy R.Ya.** (2020). Дослідження технологічних процесів виготовлення ніжок столів обідніх різних конструкцій / *Doslidzhennya tekhnolohichnykh protsesiv vyhotovlennya nizhok stoliv obidnikh riznykh konstruktсий* [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>
38. **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>
39. **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>
40. **Grytsak S.A., Grytsak S.S.** (2023). Determination of the influence of pressing parameters on the bending process of beech furniture blankets. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 49:48-60, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234904>
41. **Lesiv, L.E.** (2020). Study of the characteristics of combined of blockboards made of post-consumer wood. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 48, 69-86. <https://doi.org/10.36930/42224806> (in Ukrainian).
42. **Lesiv, L.E., Gayda, S.V., Salapak, L.V.** (2024). Development of a mathematical model of the strength of joined preparations from post-consumer fir wood, [Лесів, Л.Е., Гайда, С.В., Салапак, Л.В. Розроблення математичної моделі міцності зрощених заготовок із вживаної деревини ялиці]. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 50: 16-28 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245002>

43. **Medvid, L.V.** (2018). Systematization of wood waste – the basis of their effective use. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 91-104. <https://doi.org/10.36930/42184412> (in Ukrainian).
44. **Medvid, L.V.** (2021). Post-consumer wood – an additional reserve of raw materials for construction materials. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 47, 34-46. <https://doi.org/10.36930/42214706> (in Ukrainian).
45. **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>
46. **Orikhovskyy R.Ya., Gayda S.V.** (2024). Determination of running time losses in automated processing systems of woodworking, [Оріховський Р.Я., Гайда С.В. Оцінювання ефективності використання робочого часу в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 41-51 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245004>
47. **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).
48. **Project «CircHive.** (2022). 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.
49. **Vintoniv I.S., Sopushynskyy I.M., Teishinger A.** (2007). *Derevynoznavstvo* [Wood-science]. – Lviv: Apriori. – 312 p., (in Ukrainian).
50. **Voytovych I.G.** (2010). *Osnovi tekhnologii virobiv z derevini* [The basic technology of wood]. – Text-book. –Lviv: Kraine andeljat. – 304 p. (in Ukrainian).

UDC 684.4.053

Postgraduate student S.S. Grytsak – UNFU

Study of the technological process of bending ash wood

Factors affecting the bending process were analyzed: bar quality; type of wood; plasticization method; dimensions of the workpiece; type of bending; bending speed; wood temperature; wood moisture. It is substantiated that the method of bending by the method of plastification in ammonia vapors is quite promising, but poorly studied, because the process of plastification with ammonia has a chemical nature, and this requires the study of the value of the parameters of plastification for a specific type of wood in order to avoid unnecessary consumption of materials (wood, ammonia) and electricity. A methodology for the study of bending processes has been developed, based on conducting experiments for three variable factors in relation to their influence on product quality: material thickness 6, 13, 20 mm (h), bending radius 30, 60, 90 mm (R) and duration of plasticization of blanks 12, 36, 60 mm (T). Based on the results of the experimental data processing, a regression equation was obtained that describes the dependence of the number of quality blanks Y on the material thickness $h(x_1)$, the bending radius $R(x_2)$ and the duration of plasticization $T(x_3)$. An adequate mathematical model describing the percentage of high-quality ash wood blanks from the three studied factors was obtained. The analysis shows that when the thickness of the blanks is 6 mm, the bending radius $R(x_2)$ and the duration of plasticization of the blanks $T(x_3)$ do not significantly affect the number of high-quality blanks, and this indicator approaches 100%. Whereas for the thickness of the blanks of 20 mm, with a bending radius of $R=30$ mm, we have the number of quality blanks at the level of 2.32%, and with the bending radius of $R=90$ mm, we have the number of quality blanks at the level of 45.47%. The dynamics of the increase in the number of high-quality blanks with an increase in the duration of plasticization for the considered conditions is 9.41% and 10.39%, respectively. The optimal conditions ($h = 6$ mm, $R = 30$ mm, $T = 12$ h) were determined, under which the highest percentage of quality parts $Y_{\max} = 99.441\%$ is observed. The feasibility of using the appropriate concentration of ammonia for plasticization during the production of bent blanks has been confirmed, but to obtain a high number of high-quality blanks, it is necessary to follow the proposed practical recommendations. Practical recommendations have been developed, based on the method of obtaining bent blanks by plasticizing in a 35% ammonia solution, which ensures the maximum yield of high-quality blanks with a thickness of 6 mm and a bending radius of 30 mm.

Keywords: wood, post-consumer wood, furniture blanks, bending, plasticization, pressing, ash wood, regression equation, model, deformability, technology.

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МІЦНОСТІ МЕБЛЕВИХ ЩИТІВ ІЗ СКЛЕСНИХ РЕЙОК ДЕРЕВИНИ БУКА

Обґрунтовано та запропоновано на підставі системного аналізу використовувати у технологічних процесах деревообробки короткомірні та розмірно-придатні залишки в масивному вигляді для виробництва МЩ. Виготовлено МЩ із деревини бука, які випробовувались на межу міцності під час статичного згину. Меблеві щити виготовлялись із твердолистяних порід (бука звичайного (*Fagus sylvatica* L.) згідно розробленої методичної сітки експерименту. За отриманими результатами побудовано математичну (регресійну) модель залежності межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$. Отримана модель є адекватною, а отже може бути використана для опису об'єкта дослідження. Визначено, що збільшення витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ в конструкції меблевого щита із деревини бука не призводить до суттєвого збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u (від 0,69 до 3,75 %). Натомість, тенденція щодо залежності впливу ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$ на зменшення межі міцності під час статичного згину σ_u є більш суттєвою (від 3,41 до 6,69 %). (рис. 3). Отримані межі міцності σ_u для всіх зразків експериментальних зразків меблевих щитів із деревини бука, задовольняють нормативні вимоги (15 МПа). За результатами експерименту здійснено оптимізацію межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$ за допомогою градієнтного методу, внаслідок якої виявлено, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 21,53$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1) = 280$ г/м² та ширини рейок з деревини бука $S(x_2) = 38,43$ мм. Встановлено, що отримані результати щодо міцності МЩ при статичному згині були зумовлені дотриманням наступних режимів (розроблених практичних рекомендацій): початкова вологість рейок – 8 ± 2 %; тиск – 80-110 бар, час витримки – 5-6 хв, температура – 88-92 °С, витрати клею – 170-190 г/м². Крім того, виконані випробування засвідчили, що одержані щитові клеєні одношарові конструкції за величиною межі міцності відповідають вимогам стандарту ДСТУ EN 13353:2009 «Щити дерев'яні. Вимоги».

Ключові слова: меблевий щит, ламель, бук звичайний (*Fagus sylvatica* L.), технологія, склеювання, моделювання, властивості деревини, математична модель, полівінілацетатні клеї, клейове з'єднання деревини, циркулярна економіка, вживана деревина, заготовки, перероблення, міцність, вологість, температура.

Вступ. Застосування твердих листяних порід для виготовлення меблевих щитів має високу *актуальність* через кілька ключових переваг: тверді листяні породи, такі як дуб, ясен, бук, мають високу щільність та міцність [1, 2, 13, 31, 33, 50, 51], що забезпечує стійкість і довгий термін служби меблів; ці породи дерева мають гарну текстуру та природний колір, що робить меблі з них візуально привабливими; використання натуральних матеріалів сприяє зменшенню впливу на довкілля порівняно з синтетичними матеріалами; меблі з твердих листяних порід легко піддаються ремонту, що дозволяє продовжити їх використання; тверді листяні породи менше схильні до вм'ятин, подряпин і інших пошкоджень, що робить їх ідеальними для щоденного використання; завдяки високій щільності, ці породи деревини менше піддаються впливу вологи та температурних змін, що мінімізує ризик деформацій меблевих щитів (МЩ). Попри всі переваги, вартість таких ма-

¹ Подібка Тарас Іванович, аспірант, кафедра технологій меблів та виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-238-45-04, +38-098-415-23-94. Email: t.podibka@nltu.edu.ua; ORCID <https://orcid.org/0009-0008-2335-9223>

теріалів є вищою порівняно з м'якими породами або штучними матеріалами, що може впливати на кінцеву ціну виробів. Але за рахунок своїх властивостей, МЩ з твердих листяних порід залишаються популярними у виробництві високоякісних меблів [1, 7, 10, 14, 19, 43, 44, 45, 46, 48, 51].

Використання вживаної деревини (ВЖД) [12, 13, 18, 25, 36, 39, 40, 52] для створення клеєних щитових конструкцій має низку особливостей та перспектив, які роблять цей підхід привабливим як з економічної, так і з екологічної точки зору [13, 15, 16, 17, 26, 27, 49]: використання ВЖД зменшує потребу у вирубці нових дерев, сприяючи збереженню лісових ресурсів і скороченню кількості відходів; вживана деревина має неповторний характер завдяки своїй історії — патина, тріщини, текстура, що робить кожен конструкцію унікальною і додає вінтажного стилю або ефекту старовини; ВЖД часто вже пройшла через процеси усадки і зміни вологості, тому менш схильна до деформацій, що покращує якість клеєних щитових конструкцій; вживана деревина може містити цвяхи, болти, залишки фарби або лаку, які потрібно ретельно видалити перед використанням. це може збільшити час і вартість обробки; не вся ВЖД підходить для повторного використання через можливі пошкодження, гниття або наявність шкідників. Потрібно ретельно оцінювати стан деревини перед використанням. Вся не кондиційна для енергетичного застосування [4, 6, 49, 52].

Перспективи застосування вживаної деревини для виготовлення меблевих щитів: у зв'язку з посиленням екологічної свідомості серед споживачів та виробників, попит на меблі та конструкції з переробленої деревини постійно зростає; у багатьох країнах існують програми підтримки використання відновлюваних матеріалів, що включає гранти, податкові пільги та інші стимули для компаній, які використовують вживану деревину; з розвитком технологій обробки деревини стає можливим більш ефективно очищення, сортування і обробка ВЖД що полегшує її застосування у виробництві [3, 5, 8, 18, 19, 20, 22, 30, 32, 41, 42]; використання вживаної деревини може бути економічно вигідним, особливо якщо вдається знайти якісний матеріал за низькою ціною. це може зменшити витрати на закупівлю нової деревини; вироби з ВЖД мають особливий шарм і привабливість, що відповідає сучасним тенденціям у дизайні інтер'єрів, де цінується автентичність і історія матеріалу. Таким чином, використання ВЖД для створення клеєних щитових конструкцій, зокрема столярних плит [1, 11, 13, 21, 23, 29, 37, 51] має значний потенціал у майбутньому, особливо в контексті сталого розвитку та зростаючого інтересу до екологічно безпечних та естетично привабливих матеріалів.

Застосування первинної та вживаної деревини бука для створення МЩ має свої проблеми та виклики, які варто враховувати при виробництві. Обидва типи деревини піддаються впливу ринку, що може впливати на їхню доступність і ціну. Незалежно від походження, деревина потребує ретельного контролю якості для запобігання використанню дефектних матеріалів у виробництві меблів.

Проблеми при застосуванні первинної деревини бука: бук — це деревина з високою щільністю, яка піддається значній усадці при зміні вологості. це може призводити до деформацій, тріщин або викривлень готових щитів; бук є досить гігроскопічною породою, що робить його чутливим до змін вологості в навколишньому середовищі. це може впливати на стабільність меблевих щитів; деревина бука має високу щільність і твердість, що ускладнює її механічну обробку,

зокрема пиляння, свердління і фрезерування. це потребує якісного інструменту і ретельної підготовки; первинна деревина бука може бути досить дорогою через обмежену доступність і високу якість сировини, що збільшує загальну вартість виробництва меблевих щитів; для збереження естетичних і фізичних властивостей бука часто необхідне додаткове покриття, наприклад, лаком або маслом, щоб захистити від вологи та механічних пошкоджень.

Проблеми при застосуванні вживаної деревини бука: вживана деревина бука може мати нерівномірну якість через попереднє використання, можливі механічні пошкодження, наявність тріщин, гниття або шкідників; ВЖД часто потребує додаткового очищення від старих фарб, лаків, цвяхів чи інших кріплень, що збільшує трудомісткість і час підготовки матеріалу; часто ВЖД може мати різну структуру, колір і властивості через різні умови експлуатації, що ускладнює створення однорідних меблевих щитів; старі поверхні можуть бути менш сприйнятливими до клеїв, що зменшує якість склеювання та може призводити до розшарування щитів з часом; існує ризик, що у ВЖД можуть залишитись шкідники, які згодом можуть пошкодити готові вироби. Необхідна додаткова обробка для знищення потенційних шкідників.

Наукові праці вчених присвячених характеристикам міцності меблевих щитів отриманих із заготовок вживаної деревини та рейок із первинної деревини породи бук. Серед основних напрямів наукових досліджень вчених необхідно зазначити наступні:

- Дослідження, що порівнюють механічні властивості меблевих щитів, виготовлених з вживаної деревини та первинної деревини бука, включаючи тести на згинання, стискання, розтягування і зсув [9, 21, 24, 34, 35].
- Вивчення адгезії клеїв до вживаної та первинної деревини бука, що впливає на загальну міцність щитів [10, 14, 19, 43, 45, 46].
- Дослідження методів очищення, сушіння і підготовки вживаної деревини, а також їх вплив на механічні властивості меблевих щитів [18, 19, 20, 22, 32].
- Аналіз впливу факторів довкілля (вологість, температура) на меблеві щити з різних типів деревини [15-17, 26, 27, 49].
- Дослідження, що безпосередньо порівнюють міцність, стабільність та інші характеристики щитів, виготовлених з первинної та вживаної деревини бука.

Особливості досліджень щодо побудови математичної моделі міцності меблевих щитів із деревини бука залежно від впливу клею та ширини рейок. Основні особливості досліджень та побудови математичних моделей:

- Моделювання впливу клею: Оцінюється міцність з'єднань між рейками, враховуючи тип клею, час затвердіння, температуру і вологість при склеюванні.
- Моделювання поведінки клеєвого шва: Враховується розподіл напружень у клеєвому шарі та його вплив на міцність щита. Важливо моделювати адгезію і когезію клею, особливо для різних типів навантажень (згин, зсув, розтяг).
- Вплив ширини рейок: Ширина рейок впливає на розподіл напружень у щиті. Ширші рейки можуть бути менш схильні до деформацій, але збільшують ймовірність внутрішніх дефектів (тріщин) [13, 28, 38, 48].
- Формулювання математичних моделей: Використання як лінійних моделей (наприклад, моделей міцності), так і нелінійних (для врахування пластичних деформацій або руйнування клеєвих з'єднань).

Аналіз наукових праць підтвердив актуальність цих питань, оскільки вирішення буде сприяти одержанню якісних МЩ із деревини бука різного походження. Але відсутність перевірених показників, в тому числі на міцність при статичному згині для конкретних порід, зокрема бука, вимагають експериментальних досліджень. Тому, безперечно, розроблення практичних рекомендацій є основою для швидкого їх залучення у виробничі процеси деревообробки.

Методика досліджень. Методика експериментальних досліджень включає: підбір рейок із деревини бука; технологічні операції чотирибічного фрезерування для отримання необхідного поперечного перерізу розміром 24×24, 24×44, 24×64 мм; нанесення клею на крайки рейок; склеювання у ваймах за шириною клеєм ПВА компанії Jowat; витримка отриманих меблевих щитів (МЩ); калібрування МЩ до товщини 20 мм; випробування взірців МЩ для визначення показників міцності при статичному згині.

Змінними факторами були: витрата клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)=140, 210, 280$ г/м² та ширина рейок з деревини бука $S(x_2)=24, 44, 64$ мм. Вихідним параметром було значення межі міцності під час статичного згину σ_u МЩ, отриманого із рейок деревини бука. Загальна кількість спостережень в експерименті становила 40. Область експерименту подана у табл. 1.

Таблиця 1. Матриця В-плану для двох змінних факторів

№ досліду	Значення вхідних факторів у досліді			
	У натуральному позначенні		У кодованому позначенні	
	Q	S	x ₁	x ₂
ПФП 2 ^k	140	24	-1	-1
	280	24	1	-1
	140	64	-1	1
	280	64	1	1
Зіркові точки	140	44	-1	0
	280	44	1	0
	210	24	0	-1
	210	64	0	1

Параметр на межу міцності під час статичного згину для МЩ із склеєних рейок деревини бука визначали на лабораторній випробувальній машині.

Результати (Results). Згідно методики досліджень було виготовлено експериментальні меблеві щити із склеєних рейок деревини бука (рис. 1) для подальшого дослідження та порівняльного аналізу шляхом випробування на межу міцності при статичному згині.



**Рис. 1. Конструкція
меблевого щита із
склеєних рейок дере-
вини бука товщиною
20 мм**

Результати експериментальних випробувань на впливу

ширин брусків та витрати клею на показники міцності при статичному згині меблевих щитів із склеєних рейок деревини бука представлено у табл. 2.

Таблиця 2. Розрахунок середніх значень та дисперсії

№	Результати y_{ij} показника міцності при статичному згині конструкцій МЩ із бука, МПа					Середнє значення в j -ій вибірці	Дисперсія в j -ій вибірці
	y_{1j}	y_{1j}	y_{1j}	y_{1j}	y_{1j}		
1	2	3	4	5	6	7	8
17	20,78	18,82	20,45	20,29	21,27	20,324	0,8488
18	20,78	22,42	22,44	21,44	21,93	21,801	0,4942
19	19,64	17,67	19,80	18,33	19,15	18,916	0,8113
20	21,93	20,78	20,45	19,80	22,09	21,011	0,9586
21	23,07	24,55	21,60	21,67	20,95	22,367	2,0847
22	20,62	20,95	19,96	18,98	20,29	20,160	0,5677
23	21,27	20,78	20,95	20,62	20,95	20,913	0,0589
24	21,93	19,15	19,47	19,80	20,13	20,095	1,1835
						165,59	7,0078

$$\text{Дисперсію відтворюваності: } S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{N}; \quad (1)$$

Підставивши дані у формулу 1 отримаємо значення дисперсії відтворюваності: $S_y^2 = 7,0078/8 = 0,875975$. Отримані коефіцієнти та їх значимість. Для визначення коефіцієнтів рівняння було використано відомі методики статистичної обробки даних і розраховано коефіцієнти рівняння регресії (табл. 3).

Таблиця 3. Розрахунок коефіцієнтів регресії математичної моделі

Коефіцієнт	Величина коефіцієнта	$t(q, f_y) S\{b_i\}$	Висновок	Межі достовірного інтервалу	
				$b_i - t_{\text{табл}} S\{b_i\}$	$b_i + t_{\text{табл}} S\{b_i\}$
b_0	21,254	0,955	знач.	20,30	22,21
b_1	0,227	0,349	незнач.	-0,12	0,58
b_2	-0,503	0,349	знач.	-0,85	-0,15
b_{11}	0,009	0,739	незнач.	-0,73	0,75
b_{22}	-0,750	0,739	знач.	-1,49	-0,01
b_{12}	0,154	0,427	незнач.	-0,27	0,58

$$\text{Для дисперсії адекватності: } \sum_{j=1}^8 (\bar{y}_j - y_j^p)^2 \quad (2)$$

Таблиця 3. Розрахунок дисперсії адекватності

№ досліду	$\bar{y}_j$	y_j^p	$(\bar{y}_j - y_j^p)^2$
17.	20,32	20,94	0,3828
18.	21,80	21,09	0,5072
19.	18,92	19,63	0,5072
20.	21,01	20,39	0,3828
21.	22,37	21,04	1,7712
22.	20,16	21,49	1,7712
23.	20,91	21,01	0,0087
24.	20,09	20,00	0,0087
Сума			5,3397

Визначаємо дисперсію адекватності: $S_{ad}^2 = \frac{n}{f_{ad}} \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - y_j^p)^2$ (3)

$$S_{ad}^2 = 5/(8-7) \times 5,3397 = 26,7.$$

Розрахункове значення критерію Фішера: $F_{розр.} = \frac{S_{більша}^2}{S_{менша}^2} = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}$ (4)

Підставивши дані у формулу 4 отримаємо розрахункове значення критерію Фішера $F_{розр.}$: $F_{розр.} = 26,7 / 0,875975 = 30,48$. Табличне значення критерію Фішера $F_{табл.}$, яке залежить від рівня значимості $q=5\%$, числа ступенів вільності дисперсії адекватності $f_{ad}=8-7=1$ та числа належних оцінок дисперсії відтворюваності $f_y=8*(5-1)=32$: $F_{табл.}=252$. Оскільки, $30,48 < 252$ ($F_{розр.} < F_{табл.}$), тоді регресійна модель адекватна. За результатами оброблення даних експерименту отримано рівняння регресії другого порядку, яке описує залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$.

Одержана математична модель – рівняння регресії в нормалізованих значеннях змінних факторів має вигляд:

$$y = 21,254 + 0,227x_1 - 0,503x_2 + 0,009x_1^2 - 0,750x_2^2 + 0,154x_1x_2$$

Запис математичної моделі – рівняння регресії в натуральних значеннях змінних факторів такий:

$$\sigma_u = 21,85 - 0,002373 Q + 0,11675 S + 0,00000184 Q^2 - 0,001875 S^2 + 0,00011 Q S.$$

Таким чином, два досліджуваних змінних фактори по різному впливають на межу міцності під час статичного згину σ_u , зокрема витрата клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ прямопропорційно, а ширина рейок з деревини бука $S(x_2)$ – оберненопропорційно. Але вплив другого фактору ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$ на межу міцності під час статичного згину σ_u у порівнянні з першим $Q(x_1)$ є в 2,2 ($0,503/0,227$) рази більшим.

Графічна інтерпретація залежностей на рис. 2 та рис. 3.

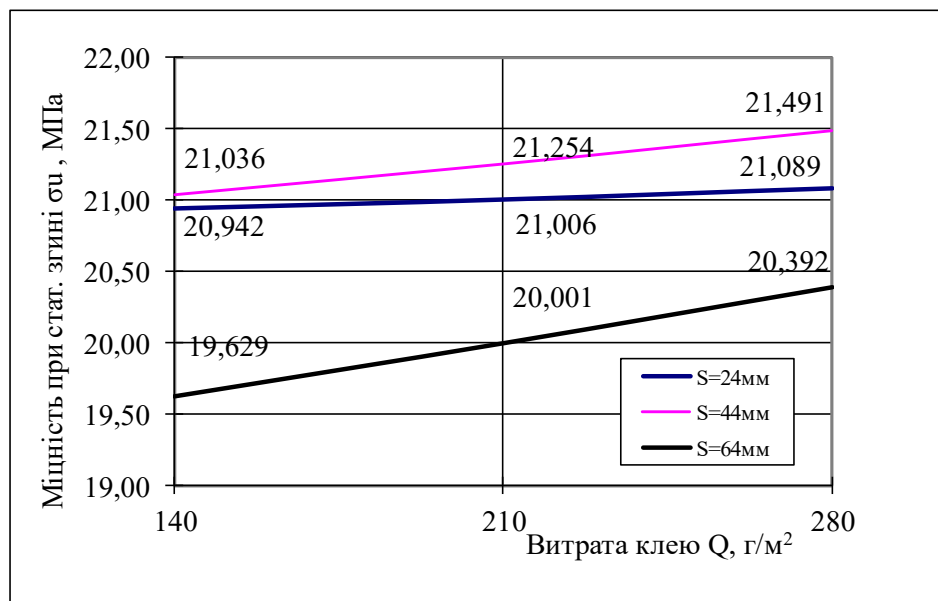


Рис. 2. Залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ для меблевих щитів із деревини бука

Як видно з рис. 2, збільшення витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ в конструкції меблевого щита із деревини бука не призводить до суттєвого збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u (від 0,69 до 3,75 %). Натомість, тенденція щодо залежності впливу ширини рейок з деревини бука

ку фугу $Q(x_1)$ в конструкції меблевого щита із деревини бука не призводить до суттєвого збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u (від 0,69 до 3,75 %). Натомість, тенденція щодо залежності впливу ширини рейок з деревини бука

$S(x_2)$ на зменшення межі міцності під час статичного згину σ_u є більш суттєвою (від 3,41 до 6,69 %). (рис. 3). Отримані межі міцності σ_u для всіх зразків експериментальних зразків меблевих щитів із деревини бука, задовольняють нормативні вимоги (15 МПа).

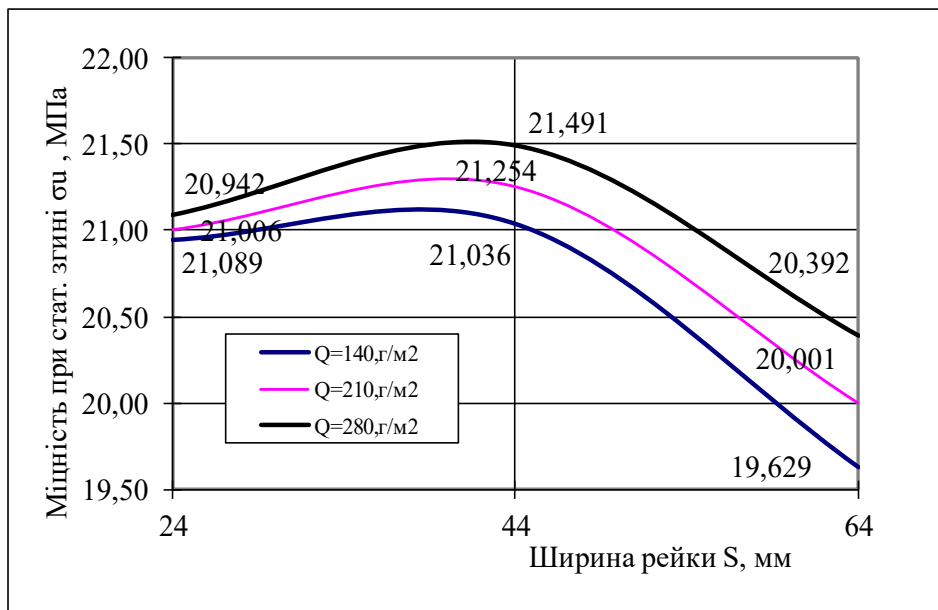


Рис. 3. Залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від ширини рейок $S(x_2)$ для меблевих щитів із деревини бука

За результатами експерименту здійснено оптимізацію межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні

рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$ за допомогою градієнтного методу, внаслідок якої виявлено, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 21,53$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1) = 280$ г/м² та ширини рейок з деревини бука $S(x_2) = 38,43$ мм (рис. 4).

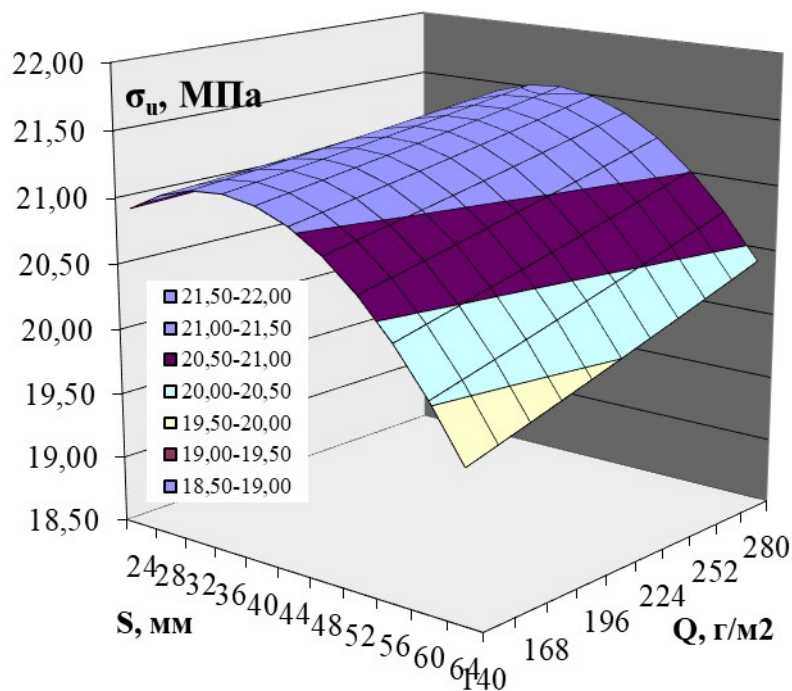


Рис. 4. Графічна залежність межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$

Дискусія. Обґрунтовано та запропоновано використовувати у технологічних процесах деревообробки на підставі системного аналізу короткомірні та розмірно-придатні залишки в масивному вигляді для виробництва МЩ.

Отримані взірці із МЩ випробовувались на межу міцності під час статичного згину. За отриманими результатами побудовано математичну (регресійну) модель залежності межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$. Отримана модель є адекватною, а отже може бути використана для опису об'єкта дослідження. Визначено, що збільшення витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ в конструкції МЩ із деревини бука не призводить до суттєвого збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u (від 0,69 до 3,75 %). Натомість, тенденція щодо залежності впливу ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$ на зменшення межі міцності під час статичного згину σ_u є більш суттєвою (від 3,41 до 6,69 %). Отримані межі міцності σ_u для всіх зразків експериментальних зразків меблевих щитів із деревини бука, задовольняють нормативні вимоги (15 МПа). За результатами експерименту здійснено оптимізацію межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$ за допомогою градієнтного методу, внаслідок якої виявлено, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 21,53$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1) = 280$ г/м² та ширини рейок з деревини бука $S(x_2) = 38,43$ мм.

Меблеві щити виготовлялись із твердолистяних порід (бука звичайного (*Fagus sylvatica* L.) згідно розробленої методичної сітки експерименту. Отримані результати щодо міцності МЩ при статичному згині були зумовленні дотриманням таких режимів (розроблених практичних рекомендацій): початкова вологість рейок – 8 ± 2 %; тиск – 80-110 бар, час витримки – 5-6 хв, температура – 88-92 °С, витрати клею – 170-190 г/м². Крім того, виконані випробування засвідчили, що одержані щитові клеєні одношарові конструкції за величиною межі міцності відповідають вимогам стандарту ДСТУ EN 13353:2009 «Щити дерев'яні. Вимоги».

Висновки.

1. Обґрунтовано та запропоновано на підставі системного аналізу використовувати у технологічних процесах деревообробки короткомірні та розмірно-придатні залишки в масивному вигляді для виробництва МЩ.

2. Виготовлено МЩ із деревини бука, які випробовувались на межу міцності під час статичного згину. Меблеві щити виготовлялись із твердолистяних порід (бука звичайного (*Fagus sylvatica* L.) згідно розробленої методики експерименту.

3. За отриманими результатами побудовано математичну (регресійну) модель залежності межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$. Отримана модель є адекватною, а отже може бути використана для опису об'єкта дослідження. Визначено, що збільшення витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ в конструкції МЩ із деревини бука не призводить до суттєвого збільшення межі міцності під час статичного згину σ_u (від 0,69 до 3,75 %). Натомість, тенденція щодо залежності впливу ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$ на зменшення межі міцності під час статичного згину σ_u є більш суттєвою (від 3,41 до 6,69 %). (рис. 3). Отримані межі міцності σ_u для всіх зразків експериментальних зразків МЩ із деревини бука, задовольняють нормативні вимоги (15 МПа).

4. За результатами експерименту здійснено оптимізацію межі міцності під час статичного згину σ_u від витрати клею при склеюванні рейок на гладку фугу $Q(x_1)$ та ширини рейок з деревини бука $S(x_2)$ за допомогою градієнтного методу, внаслідок якої виявлено, що максимальне значення межі міцності під час статичного згину $\sigma_u = 21,53$ МПа, взяте за абсолютною величиною, можна отримати зафіксувавши витрати клею при склеюванні рейок $Q(x_1) = 280$ г/м² та ширини рейок з деревини бука $S(x_2) = 38,43$ мм.

5. Встановлено, що отримані результати щодо міцності МІЩ при статичному згині були зумовлені дотриманням наступних режимів (розроблених практичних рекомендацій): початкова вологість рейок – 8 ± 2 %; тиск – 80-110 бар, час витримки – 5-6 хв, температура – 88-92 °С, витрати клею – 170-190 г/м². Крім того, виконані випробування засвідчили, що одержані щитові клеєні одношарові конструкції за величиною межі міцності відповідають вимогам стандарту ДСТУ EN 13353:2009 «Щити дерев'яні. Вимоги».

References

1. **Gayda S.V.** (2000): Матеріали для виготовлення виробів з деревини / Materials for the Production of wood Products. Lviv: BMC. – 160 p. (in Ukr.).
2. **Gayda S.V.** (2015). Modeling properties of blockboards made of post-consumer wood on the basis of the finite element method. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 41, 39-49. <https://doi.org/10.36930/42154106>
3. **Gayda S.V.** (2007). Research of concentration of operations is in modern furniture production // Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry. – Lviv. – 33:73-79. (in Ukrainian.).
4. **Gayda S.V.** (2012). Production techniques and properties of fuel pellets produced from post-consumer wood // Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry. – Lviv: UNFU. – 38: 112-150.
5. **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.
6. **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).
7. **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 (in Russian).
8. **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. <https://doi.org/10.36930/42174301> (in Ukrainian).
9. **Gayda S.V.** (2017): Комплексні дослідження зміни пружних властивостей вживаної деревини ялиці з віком / *Kompleksni doslidzhennya zminy pruzhnykh vlastyvostey vzhvyvanoyi derevyny yalytsi z vikom* [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>
10. **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>.
11. **Gayda S.V.** (2018). Технологія МДФ-фасадів / *Tekhnolohiyi MDF-Fasadiv* [MDF Facade Technologies]. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 44:70-83 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184410>
12. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). Bulletin of KhNTUA 197:3-9, (in Ukrainian).
13. **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).
14. **Gayda S.V.** (2020). Analysis of structures and technologies of manufacture of modern furniture facades. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 46, 54-64. <https://doi.org/10.36930/42204606> (in Ukrainian).

15. **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).
16. **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>
17. **Gayda S.V.** (2024). Analysis of the trend of the main indicators of the wood processing industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 4-15 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245001>
18. **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.
19. **Gayda S.V., Ilkiv M.M.** (2021) : Дослідження технологічних процесів виготовлення меблевих фасадів з масивної деревини // *Doslidzhennya tekhnolohichnykh protsesiv vyhotovlennya meblevykh fasadiv z masyvnoyi derevyny*. [Research of technological processes of manufacture of meble facades from solid wood]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 47:22-33, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214703>
20. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2013). Технология очистки вторично используемой древесины иглофрезерными станками [The technology of cleaning recycled wood with needle milling machines] // *Actual problems and prospects of the development of LPK: materials II NTK.*, September 9-11, 2013 – Kostroma. – P. 36-39.
21. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2018). Shape stability as a quality criterion for PCW-made blockboards. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 17, 185-192. <https://doi.org/10.15421/411834> (in Ukrainian)
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. <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. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.352.10>.
24. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2021). Властивості вживаної деревини як визначальний чинник якості меблевих виробів / *Vlastyvosti vzhivanoyi derevyny yak vyznachal'nyy chynnyk yakosti meblevykh vyrobiv* [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). <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.** (2016). Ecological and technological aspects of recycling post-consumer wood for production compacted materials]. *Lesnoy vestnik / Forestry bulletin of MSFU* 20(3):15-22, (in Russian).
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. <https://doi.org/10.36930/42234903> (in Ukrainian).
29. **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>
30. **Gayda S.V., Petryshak I.V.** (2020). Study of the influence of breed and grinding modes on the specific productivity of grinding skin. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 5-15. <https://doi.org/10.36930/42204601> (in Ukrainian).

31. **Gayda S.V., Salapak L.V., Lesiv L.E.** (2021). Determination of an efficient technological process of manufacturing various support elements for functional surfaces. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 47: 58-72, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214708>
32. **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 (in Russian).
33. **Gayda S.V., Voytovych I.G., Orikhovskyy R.Ya.** (2020). Дослідження технологічних процесів виготовлення ніжок столів обідніх різних конструкцій / *Doslidzhennya tekhnolohichnykh protsesiv vyhotovlennya nizhok stoliv obidnikh riznykh konstruktsiy* [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>
34. **Gayda, S.V.** (2015). Investigation of physical and mechanical properties of post-consumer wood (PCW). *Actual problems of forest complex* 43:175-179 (in Russian).
35. **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>
36. **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>
37. **Lesiv, L.E.** (2020). Study of the characteristics of combined of blockboards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 48, 69-86. <https://doi.org/10.36930/42224806> (in Ukrainian).
38. **Lesiv, L.E., Gayda, S.V., Salapak, L.V.** (2024). Development of a mathematical model of the strength of joined preparations from post-consumer fir wood, [Лесів, Л.Е., Гайда, С.В., Салапак, Л.В. Розроблення математичної моделі міцності з'єднаних заготовок із вживаної деревини ялини]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 16-28 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245002>
39. **Medvid, L.V.** (2018). Systematization of wood waste – the basis of their effective use. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 91-104. <https://doi.org/10.36930/42184412> (in Ukrainian).
40. **Medvid, L.V.** (2021). Post-consumer wood – an additional reserve of raw materials for construction materials. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 47, 34-46. <https://doi.org/10.36930/42214706> (in Ukrainian).
41. **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>
42. **Orikhovskyy R.Ya., Gayda S.V.** (2024). Determination of running time losses in automated processing systems of woodworking, [Оріховський Р.Я., Гайда С.В. Оцінювання ефективності використання робочого часу в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 41-51 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245004>
43. **Podibka T.I.** (2018). Constructions and technological aspects of furniture panels in regulatory documents. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 83-90. <https://doi.org/10.36930/42184411> (in Ukrainian).
44. **Podibka T.I.** (2020). A investigation of form of stability of variously designed furniture board made of pine wood of different constructions. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 108-120. <https://doi.org/10.36930/42204613> (in Ukrainian).
45. **Podibka T.I.** (2021). Development of mathematical models for predicting dimensional stability of furniture boards using the finite element method. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 47, 73-91. <https://doi.org/10.36930/42214809> (in Ukrainian).
46. **Podibka T.I.** (2022). Determination of the regulations of the influence of the characteristics of the rails on the form resistance of furniture panels made of beech wood of different constructions. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 48, 40-56. <https://doi.org/10.36930/42214804> (in Ukrainian).

47. **Podibka T.I.** (2022). Mathematical model for calculating the economic efficiency of the process of manufacturing defect-free sections for shape-resistant furniture panels. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 48, 57-68. <https://doi.org/10.36930/42214805> (in Ukrainian).
48. **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).
49. **Project «CircHive.** (2022). 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.
50. **Vintoniv I.S., Sopushynskyy I.M., Teishinger A.** (2007). *Derevynoznavstvo* [Wood-science]. – Lviv: Apriori. – 312 p., (in Ukrainian).
51. **Voytovych I.G.** (2010). *Osnovi tekhnologii virobiv z derevini* [The basic technology of wood]. – Textbook. – Lviv: Kraine andeljat. – 304 p. (in Ukrainian).
52. **Гайда С.В. Максимів В.М., Кійко О.А., Ференц О.Б.** Залишки деревини та деревина після споживання. Класифікація. Терміни та визначення / Договір № 08.24-11-1 : проект міжнародного стандарту ISO. – Львів: НЛТУ України. – 2013. – 53 с.

UDC 684.41

Assist. T.I. Podibka – UNFU

CONSTRUCTION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE STRENGTH OF FURNITURE PANELS MADE OF GLAMINATED BEECH LAWS

It is substantiated and proposed on the basis of a system analysis to use in the technological processes of woodworking short-sized and dimensionally suitable residues in a massive form for the production of furniture boards. Furniture boards was made from beech wood, which was tested to the limit of strength during static bending. The furniture boards were made of hard-leaved species (common beech (*Fagus sylvatica* L.) according to the developed methodological grid of the experiment. Based on the obtained results, a mathematical (regression) model of the dependence of the strength limit during static bending σ_u on the consumption of glue when gluing the rails to a smooth surface was built of the joint $Q(x_1)$ and the width of the beech wood slats $S(x_2)$. The obtained model is adequate, and therefore can be used to describe the object of the study (x_1) in the design of the furniture board made of beech wood does not lead to a significant increase in the strength limit during static bending σ_u (from 0.69 to 3.75%). Instead, the trend of the influence of the width of the beech wood slats $S(x_2)$ on the reduction of the strength limit during static bending σ_u is more significant (from 3.41 to 6.69%) (Fig. 3). requirements (15 MPa). According to the results of the experiment, the strength limit during static bending σ_u was optimized from the consumption of glue when gluing the rails to a smooth joint $Q(x_1)$ and the width of the beech wood rails $S(x_2)$ using the gradient method, as a result of which it was found that the maximum value of the limit strength during static bending $\sigma_u = 21.53$ MPa, taken as an absolute value, can be obtained by fixing the consumption of glue when gluing the rails to a smooth joint $Q(x_1) = 280$ g/m² and the width of the rails from beech wood $S(x_2) = 38,43$ mm. It was established that the obtained results regarding the strength of the furniture boards during static bending were conditioned by the following regimes (developed practical recommendations): initial humidity of the rails - 8±2%; pressure - 80-110 bar, exposure time - 5-6 min, temperature - 88-92 °C, glue consumption - 170-190 g/m². In addition, the performed tests proved that the obtained panel-glued single-layer structures meet the requirements of the DSTU EN 13353:2009 standard "Wooden panels" in terms of the strength limit. Requirements".

Keywords: furniture panel, lamella, common beech (*Fagus sylvatica* L.), technology, gluing, modeling, wood properties, mathematical model, polyvinyl acetate adhesives, wood adhesive joint, circular economy, post-consumer wood, blanks, processing, strength, humidity, temperature.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО СИМБІОЗУ ПРОГРАМИ IMOS З ГНУЧКИМИ АВТОМАТИЗОВАНИМИ МЕБЛЕВИМИ ВИРОБНИЦТВАМИ

Обґрунтовано, що розробка програми Imos – це потужна система для проектування меблів, що дозволяє створювати тривимірні моделі, креслення та генерувати дані для автоматизованого виробництва. А симбіоз програми Imos з гнучкими автоматизованими виробництвами є важливим аспектом сучасного меблевого виробництва. Встановлено, що завдяки інтеграції Imos з автоматизованими виробничими лініями значно скорочується час на проектування та виготовлення меблів. Програма автоматично генерує дані для виробничих верстатів з ЧПУ, що мінімізує помилки та забезпечує швидкий перехід від етапу проектування до виготовлення. Перевірено, що сучасні гнучкі автоматизовані системи дозволяють легко налаштовувати виробничі процеси для виготовлення різних типів продукції на одній лінії. А Imos допомагає швидко адаптувати проекти під різні вимоги клієнтів, що дозволяє легко переходити від одного виробничого циклу до іншого без необхідності тривалого переналаштування обладнання. Встановлено, що завдяки можливостям Imos і гнучким автоматизованим виробництвам підприємства можуть надавати клієнтам продукцію, виготовлену під індивідуальні замовлення. А це дозволяє задовольнити різні потреби споживачів і створювати унікальні меблеві рішення. Визначено, що адаптація CAD-системи на основі Imos для проектування меблевих виробів є успішною інтеграцією та оптимізацією CAD-процесів на підприємстві. Використання програми дозволило не лише швидше та ефективніше проектувати меблі, але й створювати концепції з різною ціною вартістю, забезпечуючи гнучкість вибору матеріалів без втрати якості та функціональності виробів. Доведено, що Imos забезпечує можливість виготовлення меблів малими серіями без значних витрат на налаштування обладнання. А це важливо для підприємств, що працюють за моделлю масової кастомізації, коли кожне замовлення може мати унікальні характеристики. Актуально, що використання Imos у поєднанні з цифровими моделями та віртуальним моделюванням виробничих процесів дозволяє створити «цифровий двійник» виробництва, що допомагає тестувати процеси та виявляти можливі проблеми ще до початку фактичного виробництва. Встановлено, що симбіоз Imos з гнучкими автоматизованими виробництвами дозволяє досягти високої ефективності, гнучкості та точності у меблевому виробництві. Тобто така інтеграція не лише знижує виробничі витрати, але й сприяє підвищенню якості продукції, дозволяє швидко реагувати на потреби ринку та задовольняти індивідуальні вимоги клієнтів. Також адаптація CAD-системи Imos є стратегічно важливою для конкурентоспроможності підприємства на ринку меблевого виробництва, підтверджуючи роль гнучкої технології у просуванні індустрії вперед у сучасному економічному середовищі.

Ключові слова: CAD-системи, адаптація, вживана деревина, проектування, технологія, меблеві вироби, конструювання, перероблення, гнучке виробництво, циркулярна економіка.

Вступ. Актуальність. Актуальність створення адаптивної системи проектування меблевих виробів на основі CAD-системи, такої як Imos, є високою в сучасній меблевій індустрії. Imos CAD/CAM є спеціалізованим рішенням для меблевої промисловості, яке інтегрує процеси проектування і виробництва [69-71]. Адаптивна система на базі Imos дозволяє не лише проектувати меблі, але й автоматично генерувати програми для ЧПК верстатів. Це знижує потребу в ручному програмуванні та скорочує час на передачу креслень у виробничий процес. Imos дозволяє швидко створювати і змінювати параметричні моделі меблів, що робить систему ідеальною для виробництва за індивідуальними замовленнями. Адаптив-

¹ Луценко Андрій Олегович – аспірант кафедри технології 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.andrii@gmail.com

на система проектування забезпечує можливість легко налаштовувати розміри, матеріали, стиль і конструкцію меблів відповідно до потреб клієнта, що є особливо важливим у сучасному ринку, де зростає попит на індивідуальні рішення.

Необхідно зазначити, що Imos CAD/CAM забезпечує ефективне використання матеріалів, оскільки система автоматично розраховує оптимальні схеми формування деталей. Це дозволяє мінімізувати витрати на матеріали та зменшити кількість відходів, що особливо актуально в умовах зростаючих цін на сировину та необхідності екологічної відповідальності. Imos підтримує високоякісну 3D-візуалізацію меблів, що дозволяє створювати реалістичні зображення проектів. Це спрощує процес узгодження і дає можливість візуально перевірити кінцевий виріб перед початком виробництва. Адаптивні системи на базі Imos дозволяють працювати з параметричним дизайном, що означає, що зміна одного параметра автоматично оновлює всі пов'язані елементи конструкції. Це особливо корисно для серійного виробництва меблів, коли можна легко адаптувати проект під різні розміри або специфікації без необхідності починати процес проектування з нуля. Завдяки адаптивності системи на базі Imos, меблеві компанії можуть швидко реагувати на зміни ринкових умов та вимог клієнтів. Можливість оперативно вносити зміни до проектів дозволяє гнучко підлаштовувати виробничий процес та залишатися конкурентоспроможними. Imos може інтегруватися з системами управління ресурсами підприємства (ERP), що дозволяє автоматично передавати дані про замовлення, виробничі плани, матеріали та терміни. Це спрощує управління всім виробничим процесом та забезпечує кращу координацію між відділами підприємства. Система на базі Imos автоматично генерує необхідні креслення, специфікації та інші документи, що спрощує підготовку виробництва та зменшує ймовірність людських помилок. Адаптивні системи проектування на базі Imos легко масштабуються для використання в компаніях різного розміру – від малих до великих.

Таким чином, створення адаптивної системи проектування меблів на базі Imos є надзвичайно актуальним і стратегічно вигідним для меблевих компаній, оскільки вона забезпечує ефективність, гнучкість, швидкість виробництва та адаптацію до ринкових потреб [1, 2, 7, 8, 36]

Проблемність. Створення адаптивної системи проектування меблевих виробів на основі CAD-системи, такої як Imos, супроводжується певними *проблемами*, які можуть вплинути на її ефективність і впровадження. По-перше, Imos є спеціалізованим і потужним рішенням, яке потребує значних інвестицій для впровадження. Це включає вартість ліцензії на програмне забезпечення, покупку або оновлення обладнання, навчання персоналу та інтеграцію з іншими системами. Для малих і середніх підприємств такі витрати можуть бути обтяжливими. Система Imos потребує високої кваліфікації працівників для її ефективного використання. Персонал повинен мати навички роботи з CAD/CAM-системами, знання параметричного проектування та вміння взаємодіяти з ЧПК-верстатами. Це вимагає часу та ресурсів на навчання персоналу, а також може стати бар'єром для впровадження на підприємствах з низьким рівнем технічної підготовки.

Крім того, хоч Imos підтримує інтеграцію з ERP-системами та ЧПК-верстатами, інтеграція може бути складною і вимагати додаткової настройки. Кожне підприємство має свої унікальні процеси, які можуть не ідеально підходити під стандартні рішення Imos, що призводить до потреби у додатковій розробці і

налаштуванні програмного забезпечення. Imos є комплексною системою, яка містить багато функцій і можливостей, що може зробити її складною для звичайних користувачів. Неправильне налаштування параметрів або використання функцій може призвести до помилок у проектуванні або виробництві, що вимагає наявності досвідчених користувачів або консалтингової підтримки.

Попри те, що Imos підтримує параметричне проектування, деякі компанії можуть зіткнутися з обмеженнями у кастомізації системи для своїх специфічних потреб. Не всі особливості меблевого виробництва можуть бути відображені в стандартних налаштуваннях системи, що потребує додаткової кастомізації, яка може бути складною та дорогою. Як і будь-яка велика система, Imos потребує регулярного технічного обслуговування та оновлення. Це може створювати додаткові проблеми для підприємств, особливо якщо нові версії або патчі не завжди сумісні зі специфічними налаштуваннями, що використовуються на підприємстві. У випадку виникнення технічних проблем або збоїв необхідно звертатися до підтримки, що може затримувати виробничий процес. Процес впровадження адаптивної системи проектування на базі Imos може зайняти багато часу, особливо на великих підприємствах. Потрібно пройти етапи адаптації процесів, інтеграції з наявними системами, навчання персоналу, тестування та оптимізації.

Якщо компанія планує вийти на нові ринки з іншими стандартами та вимогами, система на базі Imos може потребувати значної адаптації. Це може стати проблемою при роботі в різних регіонах із різними законодавчими вимогами, що стосуються виробництва меблів, стандартів безпеки або екологічних норм. Використання Imos створює певну залежність від розробника програмного забезпечення. Якщо розробник зупинить підтримку або перестане випускати оновлення, компанія може опинитися в ситуації, коли потрібно шукати нове рішення або інвестувати в розробку альтернатив. Параметричне проектування є потужним інструментом, але його налаштування може бути складним і часозатратним. Параметри повинні бути точно налаштовані для кожного виробу, і будь-які помилки в налаштуванні можуть призвести до того, що система буде генерувати неправильні креслення або специфікації. Незважаючи на численні переваги використання Imos, створення адаптивної системи проектування меблів на її основі має свої виклики. Підприємствам потрібно зважувати як технічні, так і фінансові аспекти, а також підготуватися до можливих труднощів з інтеграцією, навчанням персоналу/

Необхідність адаптування конструкції меблевого виробу, при якій має змінюватись вартість згідно вимог споживача без змін його функціоналу та якості за використання Imos CAD/CAM. Адаптування конструкції меблевого виробу для зміни вартості, при цьому зберігаючи функціональність та якість, є важливим аспектом в меблевому виробництві, який описується показниками:

1. Imos CAD/CAM дозволяє створювати і модифікувати 3D-моделі меблів, що допомагає візуалізувати зміни конструкції і оцінити їх вплив на вартість. Ви можете швидко вносити зміни в дизайн і перевіряти, як ці зміни впливають на витрати матеріалів та час обробки. Програма може надати дані про витрати матеріалів, трудозатрати і час виготовлення, що дозволяє прорахувати різні варіанти конструкції і вибрати найбільш економічний без втрати якості.

2. Imos CAD/CAM підтримує модульне проектування, що дозволяє швидко замінювати окремі компоненти конструкції без зміни загального дизайну меблів.

Програма автоматично генерує креслення та технічні документи, що полегшує процес розрахунків та внесення змін. Це спрощує адаптацію конструкції до нових вимог споживача та допомагає уникнути помилок і забезпечити точність.

3. Imos CAD/CAM може бути інтегрована з системами автоматизації виробництва, що дозволяє швидко і точно реалізувати зміни в конструкції меблів на виробництві. Програма дозволяє провести симуляцію процесу виготовлення, що допомагає виявити потенційні проблеми на етапі проектування і уникнути їх в реальному виробництві. Загалом, використання Imos CAD/CAM для адаптації конструкції меблів дозволяє зберегти функціональність і якість виробу, забезпечуючи при цьому гнучкість у зміні вартості відповідно до вимог споживача.

Актуальність створення адаптивної системи проектування меблевих виробів на основі CAD-системи на базі Imos, виходячи із реалізації принципів циркулярної економіки. Створення адаптивної системи проектування меблевих виробів на основі CAD-системи на базі Imos може бути дуже актуальним для реалізації принципів циркулярної економіки, зокрема за такими позиціями:

1. Адаптивна система може допомогти в оптимізації використання матеріалів, зменшуючи відходи. Це важливо для циркулярної економіки, яка прагне максимально використовувати ресурси і зменшувати їх витрати [23, 24, 25, 37, 45, 61].

2. Система може бути налаштована для проектування меблів таким чином, щоб їх було легше розбирати та ремонтувати. Це підтримує довговічність продукції і полегшує її повторне використання або переробку [10, 16, 17, 18, 21, 26, 29, 46, 51, 52].

3. Адаптивні CAD-системи можуть підтримувати проектування модульних меблів, що дозволяє легко змінювати окремі частини без потреби в цілковитій заміні [6, 9, 17].

4. Впровадження CAD-системи з можливістю аналізу життєвого циклу може допомогти в оцінці екологічного впливу меблів протягом їхнього використання, від виготовлення до утилізації [10, 17, 34, 35, 40, 41, 44, 45, 47, 53, 54, 64].

5. Імплементация інтеграційних можливостей з постачальниками для отримання даних про наявність і характеристики матеріалів може допомогти у виборі екологічно чистих і відновлювальних матеріалів із вживаної деревини, в якій властивості відповідають нормативним вимогам [5, 6, 11, 13, 14, 15, 18, 21, 26, 32, 33, 38, 62].

6. Адаптивна система може підтримувати локальні специфікації і потреби, що дозволяє зменшити витрати на транспортування і адаптувати продукцію під місцеві умови.

7. Розроблення нових технологій із перероблення спожитої деревини [9, 12, 20, 21, 25, 28, 29, 31, 42, 43, 61, 63] для отримання скісних заготовок з належними характеристиками міцності [3, 4, 15, 19, 26, 48], деревинностружкових плит [5, 11, 34, 63], столярних плит різних конструкцій [5, 13, 14, 15, 21, 30, 39, 49, 50] та меблевих щитів [5, 16, 22, 28, 43, 55-60] різного призначення є особливо актуальним з позиції екології та реалізації принципів циркулярної економіки.

Аналіз літературних джерел. Наукові праці, присвячені створенню адаптивних систем проектування меблевих виробів на основі CAD-системи, таких як Imos, є важливим джерелом для дослідників і практиків у галузі меблевого виробництва та цифрового проектування. Відомі праці вчених, які досліджували концепції адаптивного проектування та CAD-систем у меблевій індустрії. Багато наукових досліджень зосереджено на загальних підходах до адаптивного проектування меблевих виробів, використовуючи CAD-системи. У таких дослідженнях розглядалися питання параметричного проектування, інтеграції CAD з CAM-системами, автоматизації створення креслень і виробничих процесів. Система Imos часто розглядається як приклад такого інтегрованого підходу, зокрема розглядалися концепції параметричного проектування меблів із використанням сучасних CAD/CAM-систем, де Imos позиціонується як одна з передових технологій для меблевої інду-

стрії. Праці з цього напрямку аналізують, як параметричні моделі полегшують процес адаптації дизайну меблів для різних замовлень і типів виробництва.

Інший напрям наукових досліджень стосується інтеграції CAD-систем, таких як Imos, з виробничими процесами на меблевих підприємствах. Праці вчених, зокрема Гайди С.В., у цій галузі досліджують питання ефективності автоматизації виробництва [1, 2, 7, 8, 36] та зменшення кількості помилок у процесі проектування та виробництва. Адаптивні системи розробляються для того, щоб полегшити масштабування виробництва, підвищити точність проектування і забезпечити автоматичну генерацію ЧПК-програм деревообробними центрами [1, 9, 21, 63]. Вайсман Л.А. [65] у своїх дослідженнях розглядав впровадження цифрових технологій у меблевому виробництві, зокрема використання систем автоматизації для малих і середніх підприємств. У цьому контексті Imos розглядається як система, що інтегрує процес проектування і виробництва.

Праці, присвячені параметричному проектуванню та моделюванню меблів, детально описують методики створення адаптивних моделей, які можуть бути легко налаштовані під різні розміри або типи меблів. Адаптивні CAD-системи дозволяють створювати меблеві конструкції [6, 9, 17], що автоматично змінюються відповідно до введених параметрів. Barron, A.L., & Muggleton, S.H. [66] досліджували індуктивне логічне програмування для програмної інженерії, зокрема методи параметричного проектування меблевих виробів і підкреслювали важливість створення моделей, що можуть легко адаптуватися до змін у специфікаціях замовлення. Він розглядав, як системи типу Imos спрощують цей процес, забезпечуючи автоматичну зміну параметрів і повторне створення креслень.

Дослідження, присвячені оптимізації процесів проектування меблів, також містять важливу інформацію для розуміння того, як CAD-системи допомагають підвищити продуктивність і якість виробництва. Вчені аналізують різні підходи до автоматизації проектування меблів, зокрема через використання параметричних моделей і модульних конструкцій. Farid, H., & Aroor, T. [67] у своїх працях аналізують можливості системи Imos у контексті оптимізації проектування та виробництва меблів, приділяючи увагу скороченню часу на проектування та зменшенню витрат на матеріали за допомогою CAD/CAM-систем.

Багато науковців також досліджують нові технології, такі як віртуальна і доповнена реальність, які інтегруються в системи CAD/CAM. Ці технології дозволяють користувачам візуалізувати меблі в реальному просторі, що полегшує процес проектування та узгодження замовлень з клієнтами. Fernandes, C., Gonçalves, D., & Pinto, H. [68] розглядають новітні технології, що використовуються в меблевому дизайні, включаючи інтеграцію Imos з системами віртуальної реальності, що покращує взаємодію між клієнтами та виробниками.

Мета роботи: адаптувати будь-яку конструкцію меблевого виробу у програмі Imos для мобільної реалізації в готову продукцію обладнанням гнучкого автоматизованого меблевого виробництва

Об'єкт дослідження: програмне забезпечення для конструювання меблів.

Предмет дослідження: закономірність впливу зміни матеріальної бази та меблевої фурнітури на кінцеву вартість меблевого виробу, який у будь-якому форматі швидко та мобільно виготовляється на обробних центрах гнучких автоматизованих меблевих виробництвах.

Методика досліджень (Research methodology). Методика роботи CAD-системи на базі Imos для виконання замовлення у гнучкому автоматизованому меблевому виробництві (ГАМВ) включає кілька основних етапів, які дозволяють здійснювати повний цикл розробки від ідеї до готового меблевого виробу, тобто з передачею документації через інтерфейс обробним центрам для виконання замовлень. Основними етапами роботи в системі «Програма Imos та ГАМВ» є:

- Підготовка до проектування – визначення вимог та обмежень проекту.
- Створення концепції – визначається загальний вигляд меблевого виробу, його функціональність та основні характеристики.
- Деталізація та моделювання – детально опрацьовуються всі складові меблевого виробу.
- Візуалізації та аналіз – після створення 3D-моделі, система Imos дозволяє візуалізувати виріб у віртуальному середовищі. Крім цього, система дозволяє проводити аналіз різних аспектів, таких як функціональність, ергономіка та витрати матеріалів;
- Робота з документацією – після завершення моделювання та аналізу, система Imos допомагає автоматизувати процес створення технічної документації – креслення, специфікації матеріалів та фурнітури, додаткові види, розрізи та інші деталі, необхідні для виробництва меблів;
- Гнучке виробництво – заключний та основним дієздатним етапом є передача підготовленої документації на гнучке автоматизоване меблеве виробництво. Завдяки точним кресленням та інструкціям, виробництво меблевих виробів проходить з високою точністю та ефективністю, оскільки до роботи залучаються гнучкі виробничі модулі [1, 2, 7, 8, 36], гнучкі виробничі комплекси та деревообробні центри [1, 9, 21, 63], що мають три-шість ступенів вільності.

Методика роботи з CAD-системою на базі Imos допомагає виробникам меблів на всіх етапах роботи: проектування, презентація, конструювання та гнучку і мобільне меблеве виробництво. Спеціалізовані інструменти для конструювання у 3D об'єднані із сучасними верстатами з числовим програмним керуванням (ЧПК) та новими комунікаційними платформами. Це означає, що індивідуальні меблі можна створити з мінімальними витратами та з прецизійною точністю та якістю.

Методи дослідження: метод комп'ютерного моделювання; методи математичного програмування; методи виготовлення продукції; методи аналізу, спостереження, порівняння, прогнозування; методи експериментальних досліджень.

Результати (Results). **Порівняльний аналіз переваг та недоліків програмного забезпечення Imos, AutoCAD, SketchUp, 3ds Max, T-FLEX CAD для конструювання меблів.** Аналіз програмного забезпечення для конструювання меблів включає оцінку таких популярних систем, як Imos, AutoCAD, SketchUp, 3ds Max та T-FLEX CAD. Кожна з цих програм має свої сильні та слабкі сторони, залежно від конкретних вимог меблевого проектування, зокрема (табл. 1):

Imos – це спеціалізоване програмне забезпечення для меблевої індустрії, яке використовує CAD/CAM технології для проектування та виробництва меблів. **Переваги:** Imos розроблений спеціально для проектування меблів, що дозволяє точно відображати конструкцію, матеріали та комплектуючі. Програма автоматично генерує керуючі програми для ЧПК-обладнання, що спрощує процес виготовлення меблів. Користувач може легко змінювати розміри, матеріали та конфігурацію меблів, що робить проектування гнучким і адаптивним. Включає готові бібліотеки фурнітури, кріплень і матеріалів, що прискорює роботу дизайнера. **Недоліки:** Ліцензії Imos є досить дорогими, що може бути недоліком для малих меблевих підприємств. Програма має багатий функціонал, що вимагає часу для освоєння, особливо для нових користувачів. На відміну від інших CAD-програм, Imos спеціалізується виключно на меблевій галузі, тому не є універсальним інструментом для інших завдань.

AutoCAD – це універсальне програмне забезпечення для 2D і 3D проектування, яке використовується в різних галузях, включаючи меблеве виробництво. **Переваги:** AutoCAD підходить для створення креслень меблів і для інженерного проектування в інших сферах. Програма

забезпечує точне 2D-креслення і підтримує міжнародні стандарти. AutoCAD є стандартом у багатьох галузях, що спрощує обмін файлами та співпрацю між дизайнерами та інженерами. **Недоліки:** AutoCAD не має спеціальних інструментів для меблевого виробництва, що робить процес проектування меблів менш зручним у порівнянні зі спеціалізованими програмами, такими як Imos. Як і Imos, AutoCAD має значну вартість ліцензії, особливо для малого бізнесу. Освоєння AutoCAD потребує значного часу, особливо для новачків.

SketchUp – це просте у використанні програмне забезпечення для 3D моделювання, популярне серед дизайнерів меблів. **Переваги:** SketchUp має інтуїтивний інтерфейс, що робить його популярним серед початківців. Програма дозволяє швидко створювати 3D-моделі меблів і приміщень, що корисно для швидкої візуалізації. SketchUp пропонує безкоштовну версію, що робить його доступним для індивідуальних користувачів і малих компаній. **Недоліки:** У безкоштовній версії є обмежені можливості для технічних креслень і точного проектування меблів. SketchUp не підходить для автоматизації процесів ЧПК або інтеграції з САМ-системами. Більше орієнтований на 3D-візуалізацію, ніж на точне проектування в 2D.

3ds Max – це програма для 3D моделювання та анімації, широко використовується для візуалізації та створення фотореалістичних зображень. **Переваги:** 3ds Max дозволяє створювати фотореалістичні зображення меблів і інтер'єрів, що ідеально підходить для презентацій. Програма забезпечує широкий набір інструментів для створення складних 3D-моделей меблів. 3ds Max дозволяє створювати анімацію меблів для рекламних або презентаційних матеріалів. **Недоліки:** Програма має складний інтерфейс і вимагає часу на навчання, особливо для новачків. Хоча програма чудово підходить для візуалізації, вона не забезпечує достатньої точності для створення креслень меблів. Як і AutoCAD, 3ds Max є дорогим забезпеченням.

T-FLEX CAD – це потужна система для параметричного проектування, що використовується в інженерних галузях, включаючи меблеве виробництво. **Переваги:** T-FLEX CAD дозволяє створювати параметричні моделі меблів, що забезпечує швидкі зміни в розмірах і конструкції. Програма підтримує створення точних креслень і 3D-моделей, що підходить для комплексного проектування меблів. T-FLEX CAD може бути інтегрована з САМ-системами для автоматизації виробничих процесів на ЧПК-обладнанні. **Недоліки:** Програма вимагає певного часу для навчання через складний інтерфейс і функціонал. T-FLEX CAD менш відомий на ринку в порівнянні з AutoCAD або 3ds Max, що може створити труднощі у пошуку підтримки або готових шаблонів. Хоча вартість нижча за AutoCAD, T-FLEX CAD все ж є досить дорогим рішенням.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз програмного забезпечення

Програма	Переваги	Недоліки
Imos	Спеціалізоване на меблях, інтеграція з ЧПК, параметричне проектування	Висока вартість, складне навчання
AutoCAD	Універсальність, точність креслення, підтримка стандартів	Відсутність меблевої спеціалізації, складне освоєння
SketchUp	Простота використання, швидке 3D-моделювання, безкоштовна версія	Обмежені функції для професійного проектування, не підтримує ЧПК
3ds Max	Реалістична візуалізація, анімація, потужні інструменти для 3D	Висока вартість, складний інтерфейс, не призначений для технічного проектування
T-FLEX CAD	Параметричне моделювання, інтеграція з САМ, точність креслень	Складність навчання, менша популярність

Основні умови для створення адаптаційної системи проектування на базі системи Imos. Створення адаптаційної системи проектування на базі системи Imos може сприяти більш ефективному та гнучкому процесу конструювання меблевих виробів. Складові компоненти системи наступні:

- Розроблення інтерактивного онлайн-конфігуратора, враховуючи пропозицію ринку, де користувачі можуть обирати різні параметри меблів, але з деякими обмеженнями, щоб завжди зберігати баланс між ціною, якістю та наявністю матеріальної бази. З інтеграцією Imos, користувачі можуть бачити реальні зміни на своїх меблях під час вибору параметрів. Розроблення бі-

бібліотеки стандартних модулів та компонентів, які можна використовувати для побудови меблевих блоків з можливістю заміни матеріалу чи фурнітури за принципом – зниження вартості кінцевого продукту без втрати у дизайні. Це забезпечить можливість легко комбінувати меблеві модулі з вихідним технічним завданням від дизайнера, враховуючи кінцевого споживача.

- Інтеграція можливості перегляду та візуалізації меблів в реальному часі під час їх проектування. Користувачі зможуть переконатися, що зміна вартості матеріалів не буде впливати на кінцевий дизайн виробів. Створення системи зберігання посилань на уподобання користувачів, які вони можуть редагувати та обмінюватися з іншими. Створення системи рекомендацій, що базується на використанні аналітики та машинного навчання для створення системи рекомендацій. На основі попередніх проектів користувачів та їхніх виборів, система може запропонувати схожі або популярні дизайни.

- Побудова співпраці з клієнтами, що дозволяє їм клієнтам брати участь у процесі проектування та вносити зміни. Це може бути реалізовано через спільні робочі області або онлайн-зустрічі. Аналіз популярності і зворотний зв'язок полягає у тому, що моніторинг того, який дизайн є найпопулярнішими серед користувачів, допоможе зрозуміти його переваги та тенденції.

Все це разом ефективно працює, але щоб подати зібрану інформацію необхідно використовувати графічні діаграми та проводити SWOT-аналіз, який є одним із найпоширеніших аналітичних методів, що дозволяє в комплексі оцінити сильні й слабкі сторони системи, а також можливості та недоліки, що впливають на неї.

Розроблення прототипу робочої системи на основі Imos з врахуванням зібраної інформації, проведених досліджень, аналізу ринку та визначення пріоритетів для ефективного функціонування системи базується на етапах:

- Етап №1. Аналіз зібраної інформації стосовно мети та завдання досліджень пов'язаних з функціонуванням робочої системи на базі Imos.

- Етап №2. Розроблення дієздатності робочої системи на базі Imos, що базується функціональних можливостях продукту (функціональних можливостей, які будуть включені в прототип системи) та потреби користувачів та проектантів.

- Етап №3. Вибір інструментів та платформи, які будуть найбільш відповідними для розробки системи на базі Imos та будуть використані для інтеграції функціональності.

- Етап №4. Проектування інтерфейсу користувача, що охоплює логіку взаємодії між компонентами та функціями системи. Заповнення бібліотеки користувача логічними за послідовністю використання елементами, фурнітурою та виробниками плитних матеріалів. Зазначення в розділах актуальної продукції як пріоритетної та забезпечення до розділів швидкого доступу.

- Етап №5. Розроблення прототипу системи, включаючи основні функції та функціональність з врахуванням визначених пріоритетів. Інтегрування функцій Imos, які підходять для розроблення прототипу. Запуск системи в тестових умовах для дослідження її стабільності та зручності у користуванні. Проведення за необхідності кількох дослідів з проектантами, використовуючи реалізовані проекти для порівняння сталого підходу до проектування та проектування за допомогою розробленого прототипу. Визначення відсотку ефективності (швидкодія роботи над проектом) сформованої робочої системи на базі Imos.

Визначення умов сумісності програмного забезпечення деревообробних центрів з програмою Imos CAD/CAM. Imos CAD/CAM є потужною програмою для проектування і управління деревообробними центрами. Аналіз сумісності програмного забезпечення деревообробних центрів з Imos CAD/CAM потребує дотримання наступних умов для безперебійної та ефективної роботи:

- Формати даних деревообробних центрів повинні мати DXF, DWG формати. Комунікаційні протоколи деревообробних центрів повинні мати G-код, XML або інші специфічні протоколи. Параметри обробки такі як швидкість обробки, тип інструментів, налаштування глибин і інші параметри повинні дистанційно налаштовуватись Imos CAD/CAM.

- Інтерфейс деревообробних центрів має бути сумісним інтерфейсом Imos CAD/CAM для безпосередньої інтеграції. Драйвери деревообробних центрів мають бути інтегровані з Imos CAD/CAM, щоб забезпечити коректну взаємодію між програмним і апаратним забезпеченням.

Дослідження симбіозу програми Imos з гнучкими автоматизованими меблевими виробництвами. Imos – це програмне забезпечення для проєктування меблів, що дозволяє створювати точні 3D-моделі, робочі креслення та технологічну документацію. Воно інтегрується з автоматизованими виробничими лініями (наприклад, ЧПУ-верстатами), забезпечуючи безперервний процес від проєктування до виробництва. Дослідження симбіозу програми Imos з ГАМВ є актуальним у контексті стрімкого розвитку цифрових технологій у меблевій промисловості. Цей симбіоз дозволяє поєднувати ефективність програмного забезпечення для проєктування з ГАМВ, що значно підвищує продуктивність, оптимізує витрати та забезпечує індивідуалізацію продукції. Переваги наступні:

- Цифровізація меблевого виробництва полягає у тому, що програма Imos спеціалізується на розробці меблевих конструкцій у 3D-форматі, автоматизації процесів розкрою матеріалів, генерації креслень та інших технічних даних. Це дозволяє значно скоротити час на підготовку виробничої документації та зменшити кількість помилок. Інтеграція з ГАМВ, як-от ЧПУ-обладнання та автоматизовані лінії, дозволяє повністю автоматизувати процес виготовлення меблів, від проєктування до обробки. Згідно з доповідями про цифровізацію у меблевій галузі, автоматизація процесів з використанням програм, як-от Imos, дозволяє збільшити продуктивність виробництва на 25-30%, зменшити кількість відходів та знизити витрати до 20% [1, 2].

- ГАМВ дозволяють легко адаптуватися до нових замовлень або змін у вимогах до продукції. У поєднанні з програмним забезпеченням Imos це дає змогу автоматизовано створювати індивідуальні замовлення під конкретні вимоги споживачів без необхідності тривалого переналаштування виробничих ліній. Якщо клієнт хоче змінити параметри меблів (розмір, форма, матеріал), Imos дозволяє швидко оновити креслення та передати ці дані на автоматизовану виробничу лінію, де відбудеться переналаштування виробничого обладнання під нові вимоги без переривання виробничого процесу.

- Imos інтегрується з іншими програмними системами управління, такими як ERP (системи планування ресурсів підприємства) і MES (системи управління виробництвом), що дозволяє створити єдиний цифровий потік даних від замовлення до доставки продукції. Завдяки цьому підприємства можуть більш ефективно контролювати виробничий процес, оптимізувати постачання матеріалів і зменшувати час простоїв обладнання. Згідно з аналізом інтеграції цифрових систем у меблевому виробництві, підприємства, що використовують такі системи, як Imos у поєднанні з гнучкими виробничими системами, можуть скоротити час циклу виробництва на 30–40%, що сприяє швидкому реагуванню на змінні вимоги ринку.

- Однією з головних переваг симбіозу Imos та гнучких виробництв є можливість масової кастомізації – виробництва індивідуальних меблевих елементів у масштабі, близькому до масового виробництва. Це особливо актуально для меблевої галузі, де вимоги до дизайну, розмірів та матеріалів можуть значно варіюватися. Дослідження на тему масової кастомізації в меблевій промисловості показують, що підприємства, які використовують подібні технології, можуть збільшити задоволеність клієнтів до 25%, а також підвищити лояльність завдяки можливості створення індивідуальних рішень на замовлення. Автоматизація процесів з використанням Imos у меблевих виробництвах дозволяє ефективніше використовувати матеріали. Програма автоматично оптимізує розкрій матеріалів, що зменшує відходи. Також завдяки гнучкості виробничих ліній зменшується кількість простоїв, а це дозволяє підвищити ефективність використання обладнання. За оцінками спеціалістів, впровадження виробничих систем у поєднанні з програмами на кшталт Imos може знизити виробничі витрати на 15-20%, завдяки скороченню часу на переналаштування обладнання та зменшенню кількості помилок.

- Imos та гнучкі автоматизовані виробництва є частиною тенденції Індустрії 4.0, яка передбачає інтеграцію цифрових технологій у виробничі процеси [37]. Виробники меблів, які впроваджують такі системи, отримують переваги завдяки автоматизації процесів, роботизації та застосуванню технологій інтернету речей (IoT). Згідно з дослідженнями Gartner, компанії, які впроваджують принципи Індустрії 4.0, зокрема гнучкі виробничі системи та цифрові програми, такі як Imos, можуть збільшити загальну ефективність обладнання на 20-30% [7, 8].

Таким чином, симбіоз програми Imos з гнучкими автоматизованими меблевими виробництвами є важливим кроком у розвитку сучасної меблевої промисловості. Ця комбінація дозволяє значно підвищити продуктивність, скоротити час виробництва, зменшити витрати та підвищити рівень кастомізації продукції, забезпечити якість продукції та скоротити терміни виконання замовлень, що робить процес більш ефективним і конкурентоспроможним. В умовах глобальної конкуренції та швидких змін у попиті, використання цифрових технологій та автоматизованих процесів стає вирішальним для успішної діяльності підприємств.

Дискусія (Discussion). Дослідження симбіозу програми Imos з гнучкими автоматизованими меблевими виробництвами як основа для реалізації принципів циркулярної економіки показує, що інтеграція програми Imos з ГАМВ може стати основою для впровадження принципів циркулярної економіки у меблевій галузі. Циркулярна економіка фокусується на збереженні ресурсів, мінімізації відходів та повторному використанні матеріалів, що є критичними в сучасних умовах обмежених ресурсів та екологічних викликів.

Одним із ключових принципів циркулярної економіки є ефективне використання матеріалів. Imos дозволяє точно моделювати та проєктувати меблі, автоматично оптимізуючи розкрій матеріалів, що допомагає мінімізувати відходи на етапі виробництва. Програма Imos дозволяє знизити кількість матеріальних втрат на 10–20% завдяки автоматичній оптимізації процесу розкрою та використанню сучасних алгоритмів. Це сприяє впровадженню принципів циркулярної економіки, оскільки зменшується кількість відходів, які потрібно утилізувати.

Принципи циркулярної економіки передбачають створення продукції з акцентом на довговічність, ремонтпридатність та можливість повторного використання. Програма Imos дозволяє проєктувати меблі з модульною структурою, що полегшує їх ремонт і обслуговування. Меблі, спроектовані за допомогою Imos, можуть складатися з окремих модулів, які легко замінити або відремонтувати, продовжуючи термін служби продукту.

ГАМВ, інтегровані з програмами, як-от Imos, можуть бути налаштовані на використання повторно оброблених матеріалів або компонентів. Це дозволяє меблевим виробникам переробляти матеріали з відходів та використаних меблів для створення нової продукції. У меблевій галузі автоматизація процесів переробки та повторного використання матеріалів дозволяє зменшити витрати на сировину на 15–25% [63]. Програми, такі як Imos, дозволяють створювати індивідуальні рішення для обробки перероблених матеріалів, що відповідає принципам циркулярної економіки. ГАМВ, що інтегровані з Imos, дозволяють знижувати енерговитрати завдяки більш точному плануванню виробничих процесів. Крім того, автоматизація дозволяє зменшити кількість помилок, що скорочує потребу у повторному виготовленні деталей. За даними досліджень, використання автоматизованих систем у меблевому виробництві дозволяє зменшити енергоспоживання на 10–15%, що безпосередньо впливає на екологічність виробничих процесів.

Один із принципів циркулярної економіки – це перехід від моделі володіння продуктами до моделі «продукт як послуга», коли виробник продовжує відповідати за функціональність і стан продукту протягом його життєвого циклу. Це можливо завдяки програмному забезпеченню Imos, яке дозволяє створювати меблі, призначені для багаторазового використання та регулярного обслуговування. За

допомогою Imos меблеві компанії можуть проєктувати меблі з можливістю оновлення окремих компонентів замість повної заміни, що відповідає моделі циркулярної економіки. Це сприяє довготривалому використанню меблевих виробів

ГАМВ та програмне забезпечення Imos дозволяють інтегрувати стратегії утилізації старих меблів і повторної переробки матеріалів. Наприклад, меблі можуть бути спроектовані з урахуванням подальшої легкості розбирання для переробки або вторинного використання. Впровадження подібних стратегій у меблевій промисловості може зменшити кількість відходів на 30-40% [63], що має великий вплив на зменшення вуглецевого сліду [61] та забезпечення більш стійкого розвитку. Симбіоз Imos і ГАМВ дозволяє реалізувати концепцію замкнутого циклу, де відходи одного виробничого процесу використовуються як ресурс для іншого. Дослідження показують, що впровадження систем замкнутого циклу у виробничих процесах меблевої галузі може зменшити витрати на сировину на 20-30% [23] і значно покращити екологічні показники підприємств.

Таким чином, симбіоз програми Imos та гнучких автоматизованих меблевих виробництв є потужним інструментом для впровадження принципів циркулярної економіки у меблеву галузь. Це дозволяє мінімізувати відходи, оптимізувати використання матеріалів та енергії, продовжити життєвий цикл продукції та сприяти переходу до стійкого виробництва. Меблеві компанії, які використовують ці підходи, можуть підвищити свою екологічну відповідальність, зменшити витрати та відповідати сучасним вимогам ринку щодо сталого розвитку.

Очікувані результати при впровадженні адаптивної системи проектування меблевих виробів на основі CAD-системи на базі Imos у виробничий процес полягають у тому, що впровадження адаптивної системи проектування меблевих виробів на основі CAD-системи, такої як Imos, у виробничий процес може привести до значних покращень діяльності підприємства. Очікувані результати від впровадження цієї системи можна поділити на кілька основних категорій:

- Використання параметричних моделей у Imos дозволяє автоматично генерувати креслення та технічну документацію для меблевих виробів, що значно скорочує час на створення проєктів. Замість ручного креслення та редагування, система автоматично адаптує параметри виробу до вимог замовника. Завдяки можливостям параметричного проектування, можна швидко змінювати розміри, форму або деталі меблів, без потреби починати проєкт з нуля. Це значно підвищує продуктивність дизайнерів та інженерів. Зміни в проєкті можуть бути внесені на будь-якому етапі проектування, і система автоматично оновлює всю пов'язану документацію, зокрема креслення та специфікації.

- Автоматизація більшості процесів у системі Imos зменшує ймовірність людських помилок, що виникають під час створення креслень, розрахунків або виготовлення специфікацій. Це забезпечує більш високу точність у проектуванні та виробництві. Система генерує точні дані для ЧПК-обладнання, що забезпечує високу точність у виготовленні деталей меблів. Це зменшує кількість дефектів і відходів. Використання стандартизованих параметричних моделей сприяє підвищенню якості продукції, забезпечуючи відповідність виробів єдиним стандартам.

- Завдяки автоматизації та параметричному проектуванню, час, витрачений на розробку одного проєкту, значно скорочується. Це дозволяє компанії виконувати більше замовлень за короткий період. Використання точних розрахунків та автоматизованих специфікацій дозволяє оптимізувати використання матеріалів, зменшуючи витрати на сировину та мінімізуючи відходи. Система Imos має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що спрощує процес навчання. Персонал швидко освоює роботу з CAD/CAM-системою, що знижує витрати на навчання.

- Завдяки параметричному проектуванню, система дозволяє швидко адаптувати меблеві вироби під вимоги конкретних замовників. Це особливо важливо для компаній, що займаються

виготовленням меблів на замовлення. Адаптивна система Imos дозволяє легко масштабувати виробничі процеси, підтримуючи як одиничні замовлення, так і серійне виробництво. Це дає змогу компанії швидко реагувати на зміну ринкових вимог та обсягів замовлень.

- Imos дозволяє безшовно інтегруватися з ERP-системами для управління ресурсами та виробничими процесами, а також з ЧПК-обладнанням для автоматизації виробництва. Це дозволяє підприємству ефективніше керувати процесами, скоротити виробничі цикли та зменшити втрати. Завдяки автоматичній генерації ЧПК-кодів, система знижує потребу в ручному програмуванні обладнання, що дозволяє швидше та точніше виконувати виробничі операції.

- Система Imos надає можливість створювати реалістичні 3D-візуалізації меблів, що дозволяє краще демонструвати замовникам кінцевий вигляд продукції ще на етапі проектування. Це знижує ризик непорозумінь та підвищує задоволеність клієнтів. Завдяки автоматичному оновленню документації та візуалізації, зміни в проекті можуть бути швидко узгоджені з клієнтом, що скорочує час на затвердження та впровадження замовлень.

- Впровадження сучасної адаптивної системи проектування, як Imos, дозволяє компанії виділитися на ринку завдяки швидкості виконання замовлень, якості продукції та можливості індивідуалізації виробів. Швидкість і точність проектування дозволяють скоротити терміни виконання замовлень, підвищуючи загальну якість обслуговування і збільшуючи задоволеність.

Висновки.

1. Обґрунтовано, що розробка програми Imos – це потужна система для проектування меблів, що дозволяє створювати тривимірні моделі, креслення та генерувати дані для автоматизованого виробництва. Тобто симбіоз програми Imos з гнучкими автоматизованими виробництвами є важливим аспектом сучасного меблевого виробництва. Встановлено, що завдяки інтеграції Imos з автоматизованими виробничими лініями значно скорочується час на проектування та виготовлення меблів. Програма автоматично генерує дані для виробничих верстатів з ЧПУ (числовим програмним управлінням), що мінімізує помилки та забезпечує швидкий перехід від етапу проектування до виготовлення.

2. Перевірено, що сучасні гнучкі автоматизовані системи дозволяють легко налаштовувати виробничі процеси для виготовлення різних типів продукції на одній лінії. А Imos допомагає швидко адаптувати проекти під різні вимоги клієнтів, що дозволяє легко переходити від одного виробничого циклу до іншого без необхідності тривалого переналаштування обладнання.

3. Розраховано, що автоматизація виробничих процесів разом з використанням Imos зменшує кількість ручної праці, що знижує витрати на виробництво. Крім того, програма оптимізує використання матеріалів та розкрояє деталі так, щоб мінімізувати відходи, що позитивно впливає на економічні показники та відповідає принципам циркулярної економіки. Доведено, що високий рівень автоматизації разом з можливостями Imos дозволяє досягти максимальної точності у виготовленні меблевих деталей. Сама програма генерує точні креслення та специфікації, які автоматично передаються на виробниче обладнання, що зменшує ризик помилок і підвищує якість кінцевого продукту.

4. Обґрунтовано, що програму Imos можна інтегрувати з ERP-системами (управління ресурсами підприємства), що дозволяє компаніям ефективніше планувати свої ресурси, відстежувати запаси матеріалів, планувати виробництво і керувати замовленнями. Встановлено, що завдяки можливостям Imos і гнучким автоматизованим виробництвам підприємства можуть надавати клієнтам продукцію, виготовлену під індивідуальні замовлення. А це дозволяє задовольнити різні потреби споживачів і створювати унікальні меблеві рішення. Визначено, що адаптація CAD-системи на основі Imos для проектування меблевих виробів є успішною ін-

теграцію та оптимізацію CAD-процесів на підприємстві. Використання програми дозволило не лише швидше та ефективніше проектувати меблі, але й створювати концепції з різною ціною вартістю, забезпечуючи гнучкість вибору матеріалів без втрати якості та функціональності виробів.

5. Доведено, що Imos забезпечує можливість виготовлення меблів малими серіями без значних витрат на налаштування обладнання. А це важливо для підприємств, що працюють за моделлю масової кастомізації, коли кожне замовлення може мати унікальні характеристики. Актуально, що використання Imos у поєднанні з цифровими моделями та віртуальним моделюванням виробничих процесів дозволяє створити «цифровий двійник» виробництва, що допомагає тестувати процеси та виявляти можливі проблеми ще до початку фактичного виробництва.

6. Встановлено, що симбіоз Imos з гнучкими автоматизованими виробництвами дозволяє досягти високої ефективності, гнучкості та точності у меблевому виробництві. Тобто така інтеграція не лише знижує виробничі витрати, але й сприяє підвищенню якості продукції, дозволяє швидко реагувати на потреби ринку та задовольняти індивідуальні вимоги клієнтів. А з іншого боку, адаптація CAD-системи Imos є стратегічно важливою для конкурентоспроможності підприємства на ринку меблевого виробництва, підтверджуючи роль гнучкої технології у просуванні індустрії вперед у сучасному економічному середовищі.

References

1. **Gayda S.V.** (2015). Modeling properties of blockboards made of post-consumer wood on the basis of the finite element method. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 41, 39-49. <https://doi.org/10.36930/42154106>
2. **Gayda S.V.** (1999). Проблеми та перспективи роботизації меблевої промисловості [Problems and prospects of robotics in the furniture industry]. *Scientific Bulletin of UNFU* 9.5:192-195. (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.** (2000): Матеріали для виготовлення виробів з деревини / Materials for the Production of wood Productss. Lviv: BMC. – 160 p. (in Ukr.).
6. **Gayda S.V.** (2001): Раціональне конструювання виробів з деревини / Rational constructing of wood Productss. Lviv: BMC. – 93 p. (in Ukr.).
7. **Gayda S.V.** (2002). Особливості та перспективи роботизації меблевої промисловості України [Peculiarities and prospects of robotization of the furniture industry of Ukraine]. *Scientific Bulletin of UNFU* 12.5:38-40. (in Ukrainian).
8. **Gayda S.V.** (2003). Гнучкі виробничі модулі для виготовлення ґратчастих меблевих виробів [Flexible production modules for the production of lattice furniture products]. *Scientific Bulletin of UNFU* 13.2:120-122. (in Ukrainian).
9. **Gayda S.V.** (2004). Інтегровані технології меблевого виробництва [Integrated technologies of furniture production]. *Scientific Bulletin of UNFU* 14.4:118-121. (in Ukrainian).
10. **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).
11. **Gayda S.V.** (2011): The investigation of physical and mechanical properties of wood parti-cleboards made from post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 37(2):95-110.

12. **Gayda S.V.** (2014). *Sposoby podgotovki k pererabotke vtorichno ispol'zuyemoy drevesiny iglofrezernymi i shchotochnymi stankami* [Preparation methods for processing of post-consumer wood (PCW) needle-milling and brushing machines]. *Actual problems of forest complex* 40:65-69 (in Russian).
13. **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).
14. **Gayda S.V.** (2016). Технологічні підходи до поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом / *Tekhnologichni pidkhody do poverkhnevoho ochyshchennya vzhivanoyi derevyny holkofrezernym instrumentom* [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). Research on physical and mechanical characteristics of front blockboards made from post-consumer wood [Дослідження фізико-механічних характеристик фасадних столярних плит із вживаної деревини]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 42: 33-50.
16. **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 (in Russian).
17. **Gayda S.V.** (2017). Використання нечітких експертних систем для підтримки прийняття рішень в процесі сортування вживаної деревини / *Vykorystannya nechitkykh ekspertnykh system dlya pidtrymky pryynyattya rishen' v protsesi sortuvannya vzhivanoyi derevyny* [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>
18. **Gayda S.V.** (2017). Комплексні дослідження зміни пружних властивостей вживаної деревини ялиці з віком / *Kompleksni doslidzhennya zminy pruzhnykh vlastyvostey vzhivanoyi derevyny yalytsi z vikom* [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>
19. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). *Bulletin of KhNTUA* 197:3-9, (in Ukrainian).
20. **Gayda S.V.** (2018). Технологія МДФ-фасадів / *Tekhnolohiyi MDF-Fasadiv* [MDF Facade Technologies]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 44:70-83 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184410>
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.** (2020). Analysis of structures and technologies of manufacture of modern furniture facades. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 54-64. <https://doi.org/10.36930/42204606> (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. <https://doi.org/10.36930/42234908> (in Ukrainian).
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.** (2024). Analysis of the trend of the main indicators of the wood processing industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 4-15 (in Ukrainian).
26. **Gayda S.V., Bilyy Ya.M.** (2016). The investigation of the shape stability of glued panels made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 42, 69-79. <https://doi.org/10.36930/42164211> (in Ukrainian).
27. **Gayda S.V., Bilyy Ya.M.** (2019). Дослідження технологічних процесів виготовлення ліжок двоспальних різних конструкцій / *Doslidzhennya tekhnologichnykh protsesiv vyhotovlennya li-zhok dvospal'nykh riznykh konstruksiy* [A investigation of technological processes of making beds of double different designs]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 45:21-31 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42194504>
28. **Gayda S.V., Ilkiv M.M.** (2021) : Дослідження технологічних процесів виготовлення меблевих фасадів з масивної деревини // *Doslidzhennya tekhnologichnykh protsesiv vyhotovlennya meblevykh fasadiv z masyvnoyi derevyny*. [Research of technological processes of manufacture of meble facades from

solid wood]. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 47:22-33, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214703>

29. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2013). Технология очистки вторично используемой древесины иглофрезерными верстатами [The technology of cleaning recycled wood with needle milling machines] // Actual problems and prospects of the development of LPK: materials II NTK., September 9-11, 2013 – Kostroma. – P. 36-39. (in Russian).

30. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2018). Shape stability as a quality criterion for PCW-made blockboards. Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, 17, 185-192. <https://doi.org/10.15421/411834> (in Ukrainian)

31. **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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212484>.

32. **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>.

33. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2021). Властивості вживаної деревини як визначальний чинник якості меблевих виробів / *Vlastyvoli vzhynanoyi derevyyny yak vyznachal'nyy chynnyk yakosti meblevykh vyrobiv* [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). <https://doi.org/10.15421/412135>

34. **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>.

35. **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>

36. **Gayda S.V., Kshyvetskyi B.Ya.** (1999). Техніко-економічні характеристики деревообробної фабрики майбутнього [Technical and economic characteristics of the woodworking factory of the future]. Scientific Bulletin of UNFU 9.3:83-85. (in Ukrainian).

37. **Gayda S.V., Kushpit A.S., Huber Yu.M.** (2023). Analysis of implementation of Industry 4.0 principles in furniture production, [Гайда С.В., Кушпіт А.С., Губер Ю.М. Аналіз впровадження принципів Industry 4.0 у меблеве виробництво] Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 49: 73-84, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234906>

38. **Gayda S.V., Lesiv L.E.** (2019). Визначення та порівняння властивостей вживаної деревини основних хвойних порід / *Vyznachennya ta porivnyannya vlastyvolostey vzhynanoyi derevyyny osnovnykh khvoynykh porid* [A determination and comparison of properties of post-consumer wood of the basic conifers]. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 45:39-46 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42194506>

39. **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. <https://doi.org/10.36930/42234903>] (in Ukrainian).

40. **Gayda S.V., Maksymiv V.M.** From recycled post-consumer wood towards prime quality particleboard / Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть // міжвід. наук.-техн. зб. – Львів: НЛТУ України. – 2010, вип. 36. – С. 57-77.

41. **Gayda S.V., Nikityuk L.O.** (1998). До питання застосування екстрагованої деревини для плитного виробництв [On the issue of using extracted wood for slab production]. Scientific Bulletin of UNFU 8:75-77. (in Ukrainian).

42. **Gayda S.V., Petryshak I.V.** (2020). Study of the influence of breed and grinding modes on the specific productivity of grinding skin. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 46, 5-15. <https://doi.org/10.36930/42204601> (in Ukrainian).

43. **Gayda S.V., Salapak L.V., Lesiv L.E.** (2021). Determination of an efficient technological process of manufacturing various support elements for functional surfaces. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 47: 58-72, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214708>

44. **Gayda S.V., Voytovych I.G., Orikhovskyy R.Ya.** (2020). Дослідження технологічних процесів виготовлення ніжок столів обідніх різних конструкцій / *Doslidzhennya tekhnolohichnykh protsesiv vyhotovlennya nizhok stoliv obidnikh riznykh konstruktсий* [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>

45. **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.

46. **Gayda, S.V.** (2015). Investigation of physical and mechanical properties of post-consumer wood (PCW). Actual problems of forest complex 43:175-179 (in Russian).

47. **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>

48. **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>

49. **Lesiv, L.E.** (2020). Study of the characteristics of combined of blockboards made of post-consumer wood. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 48, 69-86. <https://doi.org/10.36930/42224806> (in Ukrainian).

50. **Lesiv, L.E., Gayda, S.V., Salapak, L.V.** (2024). Development of a mathematical model of the strength of joined preparations from post-consumer fir wood, [Лесів, Л.Е., Гайда, С.В., Салапак, Л.В. Розроблення математичної моделі міцності з'єднаних заготовок із вживаної деревини ялиці]. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 50: 16-28 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245002>

51. **Medvid, L.V.** (2018). Systematization of wood waste – the basis of their effective use. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 44, 91-104. <https://doi.org/10.36930/42184412> (in Ukrainian).

52. **Medvid, L.V.** (2021). Post-consumer wood – an additional reserve of raw materials for construction materials. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 47, 34-46. <https://doi.org/10.36930/42214706> (in Ukrainian).

53. **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>

54. **Orikhovskyy R.Ya., Gayda S.V.** (2024). Determination of running time losses in automated processing systems of woodworking, [Оріховський Р.Я., Гайда С.В. Оцінювання ефективності використання робочого часу в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва]. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 50: 41-51 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245004>

55. **Podibka T.I.** (2018). Constructions and technological aspects of furniture panels in regulatory documents. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 44, 83-90. <https://doi.org/10.36930/42184411> (in Ukrainian).

56. **Podibka T.I.** (2020). A investigation of form of stability of variously designed furniture board made of pine wood of different constructions. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 46, 108-120. <https://doi.org/10.36930/42204613> (in Ukrainian).

57. **Podibka T.I.** (2021). Development of mathematical models for predicting dimensional stability of furniture boards using the finite element method. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 47, 73-91. <https://doi.org/10.36930/42214809> (in Ukrainian).

58. **Podibka T.I.** (2022). Determination of the regulations of the influence of the characteristics of the rails on the form resistance of furniture panels made of beech wood of different constructions. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 48, 40-56. <https://doi.org/10.36930/42214804> (in Ukrainian).

59. **Podibka T.I.** (2022). Mathematical model for calculating the economic efficiency of the process of manufacturing defect-free sections for shape-resistant furniture panels. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 48, 57-68. <https://doi.org/10.36930/42214805> (in Ukrainian).

60. **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).

61. **Project «CircHive.** (2022). 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.

62. **Vintoniv I.S., Sopushynskyy I.M., Teishinger A.** (2007). *Derevynoznavstvo* [Wood-science]. – Lviv: Apriori. – 312 p., (in Ukrainian).

63. **Voytovych I.G.** (2010). *Osnovi tekhnologii virobiv z derevini* [The basic technology of wood]. – Textbook. –Lviv: Kraine andeljat. – 304 p. (in Ukrainian).
64. **Гайда С.В., Максимів В.М., Кійко О.А., Ференц О.Б.** Залишки деревини та деревина після споживання. Класифікація. Терміни та визначення / Договір № 08.24-11-1 : проект міжнародного стандарту ISO. – Львів: НЛТУ України. – 2013. – 53 с.
65. **Вайсман В.А., Колесникова Е.В., Натальчишин В.В.** (2010). Современная концепция проектно-ориентированного командного управления предприятием. Сучасні технології в машинобудуванні. – Вип. 8. – С. 246-253. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Stvm_2013_8_28.
66. **Barron, A.L., & Muggleton, S.H.** (2018). Inductive logic programming for software engineering: Lessons learned and future directions. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 51(3), 58.
67. **Farid, H., & Aroop, T.** (2021). Computer-Aided Design of Multivariable Control Systems: A Review. *Annual Reviews in Control*, 51, 169-180.
68. **Fernandes, C., Gonçalves, D., & Pinto, H.** (2019). Implementing a Product Configurator in the Furniture Industry: The Imos Case Study. In *Advances in Ergonomics in Design* (pp. 391-400). Springer.
69. <https://www.imos3d.com/en/>
70. <https://e-services.blum.com/main/?authenticationType=manual>
71. <https://www.youtube.com/@in3dsoftwaretraining107>

UDC 674.02

Post-graduate student A.O. Lutsenko – UNFU

Ensuring effective symbiosis of the Imos program with flexible automated furniture production

It is justified that the development of the Imos program is a powerful system for designing furniture, which allows you to create three-dimensional models, drawings and generate data for automated production. And the symbiosis of the Imos program with flexible automated production is an important aspect of modern furniture production. It has been established that due to the integration of Imos with automated production lines, the time for designing and manufacturing furniture is significantly reduced. The program automatically generates data for CNC production machines, which minimizes errors and ensures a quick transition from the design stage to production. It has been proven that modern flexible automated systems make it easy to adjust production processes to produce different types of products on the same line. And Imos helps to quickly adapt projects to different customer requirements, which allows you to easily move from one production cycle to another without the need for long-term reconfiguration of equipment. It has been established that thanks to the capabilities of Imos and flexible automated production, enterprises can provide customers with products made to individual orders. And this allows you to satisfy various needs of consumers and create unique furniture solutions. It was determined that the adaptation of the CAD system based on Imos for the design of furniture products is a successful integration and optimization of CAD processes at the enterprise. Using the program made it possible not only to design furniture faster and more efficiently, but also to create concepts with different price values, providing flexibility in the choice of materials without losing the quality and functionality of the products. It has been proven that Imos provides the possibility of manufacturing furniture in small series without significant costs for setting up equipment. And this is important for enterprises working on the model of mass customization, when each order can have unique characteristics. It is relevant that the use of Imos in combination with digital models and virtual simulation of production processes allows you to create a «digital double» of production, which helps to test processes and identify possible problems even before the actual production begins. It has been established that the symbiosis of Imos with flexible automated production allows to achieve high efficiency, flexibility and precision in furniture production. That is, such integration not only reduces production costs, but also improves the quality of products, allows you to quickly respond to market needs and satisfy individual customer requirements. On the other hand, the adaptation of the Imos CAD system is strategically important for the company's competitiveness in the furniture manufacturing market, confirming the role of flexible technology in moving the industry forward in today's economic environment.

Keywords: CAD-systems, adaptation, post-consumer wood, design, technology, furniture products, construction, recycling, flexible production, circular economy.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕРЕВИННИХ КОМПОЗИТИВ НА ОСНОВІ СТЕБЕЛ РІПАКУ ТА МІНЕРАЛЬНОГО В'ЯЖУЧОГО

Встановлено залежності фізико-механічних характеристик арболітових виробів від питомого вмісту у вихідній композиції ріпакових частинок і мінерального в'язучого. Отримано результати, які забезпечують встановлення закономірностей впливу технологічних параметрів на властивості деревинного композиційного матеріалу, що виготовлений з використанням відходів ріпаку. Обґрунтовано основні чинники, що впливають на міцність матеріалу, зокрема, це вміст водорозчинних речовин у лігноцелюлозному наповнювачі, адгезія наповнювача до цементного в'язучого, міцність наповнювача, активність цементу і його витрата на 1 м³ цього матеріалу. Вияснено, що підвищений вміст мінеральних речовин у стеблах ріпаку має позитивний вплив на адгезію з мінеральними в'язучими. З'ясовано, що наявність високопористої внутрішньої паренхімної тканин у стеблах ріпаку робить можливим його використання за вмістом більше 35% у стружковій масі для виготовлення теплоізоляційних деревинних композиційних матеріалів на основі мінерального в'язучого. Експериментально доведено, що деревинні композиційні матеріали, виготовлені за звичайною технологією, з додаванням у композиційні матеріали деревинних частинок до 35% ріпакових частинок мають механічні показники, що відповідають вимогам державного стандарту ДСТУ EN 312-2:2003. Запропоновано способи виготовлення композиційних матеріалів на основі мінерального в'язучого з використанням відходів ріпаку, які дають змогу розширити сировинну базу для виготовлення цих матеріалів завдяки залученню біомаси сільськогосподарського виробництва – ріпакової сировини, зменшити собівартість арболіту і, відповідно, зекономити цінну на деревинну сировину.

Ключові слова: біомаса, вживана деревина, ріпакові частинки, арболіт, в'язуче, композиція, технологія, міцність, склеювання, адгезія, перероблення, залишки, відходи, циркулярна економіка, економічна ефективність.

Вступ. Накопичення рослинної біомаси та вживаної деревини на звалищах [9] створює низку екологічних, економічних та соціальних проблем, таких як викиди парникових газів, забруднення довкілля та втрата ресурсів [7]. Використання цих матеріалів у межах концепції циркулярної економіки [7, 9, 10, 12, 20] дозволяє мінімізувати ці негативні наслідки та сприяє сталому розвитку. Замість захоронення біомаси та деревинних залишків на полігонах доцільно використовувати їх для виробництва енергії, добрив та екологічних матеріалів – деревинних композитів [1, 2, 4, 11, 12], зокрема арболіту [3, 19]. Це допоможе зменшити екологічний слід, підвищити ефективність управління відходами та сприяти розвитку регіональних економік. Одним з найбільш перспективних видів деревинних композиційних матеріалів (ДКМ) є матеріали виготовлені з використанням мінераль-

¹ Копанський Микола Михайлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: +38-032-238-44-99. E-mail: m_kopansky@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3897-4818>

² Козак Руслан Олегович – доктор технічних наук, професор кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: +38-032-238-44-99. E-mail: kozak_r@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1297-9810>

³ Кусняк Ірина Іванівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій деревинних композиційних матеріалів, целюлози та паперу. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: +38-032-238-44-99. E-mail: iryna.rondyak@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3980-3110>

ного в'язучого. Вони використовуються у будівництві та інших галузях промисловості. Деревинні матеріали на основі мінерального в'язучого різноманітні за властивостями, зовнішнім виглядом та структурою, мають високу міцність при малій, середній щільності, негорючі, біостійкі, нетоксичні. Ці композиційні матеріали містять деревинний наповнювач, мінеральну в'язучу речовину, воду і хімічні добавки, що прискорюють затвердіння цементу і покращують властивості деревинно-мінерального матеріалу. Вони поєднують у собі особливості деревини і мінеральних, неорганічних матеріалів і тому є цінними для будинкобудування.

Проблема. Щорічно накопичуються значні обсяги аграрної біомаси (зокрема, стебел ріпаку) та деревинних залишків (тріски, тирса, вживана деревина) [13, 14, 20]. Через відсутність ефективної утилізації ці ресурси часто опиняються на звалищах або спалюються, що сприяє забрудненню довкілля та втраті цінних матеріалів [5, 7, 9, 17]. Проте, з урахуванням циркулярної економіки [10], ці відходи можна використати для створення деревинних композиційних матеріалів — екологічних альтернатив традиційним матеріалам. Композиційні матеріали [1, 2] на основі рослинної біомаси та деревинних відходів представляють собою суміш органічних волокон (стебел ріпаку, тирси, трісок) з мінеральними чи полімерними зв'язуючими речовинами. Вони можуть використовуватися для виготовлення: плитних матеріалів (ДСП, МДФ, OSB) [4, 9, 11, 12, 17, 18]; будівельних блоків (арболіт, легкий бетон). Арболіт — це легкий будівельний матеріал, що складається з органічних наповнювачів (рослинної біомаси або деревини), цементу та мінеральних добавок. У контексті циркулярної економіки, яка спрямована на повторне використання ресурсів [9, 13], зменшення відходів та мінімізацію негативного впливу на довкілля, виробництво арболіту з біомаси та вживаної деревини набуває особливої актуальності.

Актуальність. Актуальність використання відновлювальних ресурсів [4, 7, 11, 12, 16], зокрема для виробництва арболіту, зумовлена кількома факторами: підвищенням екологічних стандартів, необхідністю ресурсозбереження та підвищенням теплоізоляційних вимог у будівництві. Арболіт, який містить деревну стружку та цемент, має низьку теплопровідність, добру паропроникність і високу вогнестійкість. Завдяки цим властивостям він може конкурувати з традиційними матеріалами, такими як газоблоки та керамічна цегла, при цьому забезпечуючи енергоефективність будівель. Актуальність використання стружки із вживаної деревини [6, 17, 18] та стебел ріпаку [3, 19] для виробництва арболіту обумовлена як екологічними, так і економічними чинниками. Поєднання деревинних залишків [16, 18, 20] та рослинної біомаси дозволяє ефективно використовувати вторинні ресурси, що знижує залежність від свіжої деревини. Дослідження показують, що додавання ріпакової сировини в композитні матеріали позитивно впливає на їх механічні властивості та здатність до теплоізоляції. Це дозволяє підвищити конкурентоспроможність арболіту як будівельного матеріалу, зменшуючи потребу в хімічних добавках і знижуючи вартість виробництва.

Крім того, ріпак має гарні властивості як наповнювач завдяки низькій теплопровідності та доступності, що робить його цінним ресурсом у виробництві композитів. Інтеграція цих компонентів сприяє створенню матеріалів із поліпшеними тепло- та звукоізоляційними характеристиками, які відповідають сучасним будівельним стандартам і вимогам щодо енергоефективності.

Застосування таких відновлювальних ресурсів відповідає принципам сталого розвитку та знижує екологічний слід деревообробної галузі, роблячи її більш екологічно чистою та економічно вигідною. Це підтверджують дослідження вчених Національного лісотехнічного університету України та інших наукових праць, що аналізують вплив подібних наповнювачів на якість композитних матеріалів [6, 8, 11, 15, 18] та арболіту, зокрема [19].

Ресурси. Використання біомаси, зокрема стебел ріпаку, в промисловому виробництві набуває все більшої актуальності в умовах переходу на циркулярну економіку [4, 7, 9, 10, 11, 12, 16, 20]. Це підхід, який спрямований на мінімізацію відходів, максимальне використання ресурсів та відновлення екосистем. Однак, обсяг виготовлення цих матеріалів обмежується запасами деревинної сировини, яка формується у природі на протязі багатьох років. Перспективним видом сировини для виготовлення деревинних композиційних матеріалів є лігноцелюлозна сировина рослинного походження, зокрема стебла ріпаку. Стебла ріпаку, як залишковий продукт агровиробництва, можуть стати цінним ресурсом для різних промислових галузей. Ріпак – надзвичайно цінна кормова культура, але він також може бути і одним з елементів сировинної бази у виробництві вказаних матеріалів. Проведений аналіз останніх досліджень з використання відходів сільськогосподарського виробництва для виготовлення продукції целюлозно-паперового виробництва та виробництва ДКМ дає підстави зробити висновок про те, що, окрім пшеничної та житньої соломи, є доцільним використання з цією метою і стебел ріпаку. Із соломи ріпаку (2-6 тони з гектара) можна виготовляти папір, целюлозу, картон. З одного гектара ріпакового поля можна виготовити до 2 тони паперу. Такі технології успішно застосовуються у Великобританії, Угорщині, Іспанії, Португалії. Із недеревної сировини у світі виробляють вже близько 10% целюлози.

Особливості та переваги використання додаткових ресурсів:

- Рослинна біомаса (солома, стебла ріпаку, льону та ін.) є залишковим продуктом аграрної діяльності, який зазвичай утилізується шляхом спалювання або перегнивання. Рослинні залишки та деревина під час росту поглинають вуглекислий газ, що компенсує частину викидів, пов'язаних із виробництвом матеріалів.
- Використання вживаної деревини з демонтажу, меблевих залишків чи інших джерел дозволяє зменшити кількість відходів, що опиняються на звалищах.
- Використання вторинної сировини (вживаної деревини) сприяє скороченню обсягів вирубки лісів і знижує екологічний слід. Вживання відновлюваних джерел сировини забезпечує регіональну незалежність від імпорту та зменшує залежність від традиційних будівельних матеріалів (піску, щебеню).
- Ріпак є однією з найпоширеніших олійних культур у світі, що дає значну кількість побічної біомаси у вигляді стебел та листя.
- Біомаса ріпаку залишається маловикористаною і часто утилізується шляхом спалювання, що сприяє викидам CO₂.
- Використання стебел ріпаку дозволяє створювати замкнені цикли у сільському господарстві, де рослинні залишки перетворюються на цінний ресурс для інших галузей.
- Біомаса ріпаку може замінити викопні ресурси у виробництві енергії та матеріалів, що відповідає принципам декарбонізації економіки.

Щодо економічних показників цього щорічно поновлюваного ресурсу (стебел ріпаку), то середня ринкова ціна в декілька разів менша за деревину, а також менші витрати на подрібнювальне і сушильне обладнання тощо. Включення ріпаківих стебел і деревинних залишків у виробництво арболіту покращує механічні та теплоізоляційні характеристики матеріалу. Дослідження показують, що такі

композити мають добрі експлуатаційні властивості, зокрема стійкість до вологи, що робить їх конкурентоспроможними з традиційними матеріалами. Використання вживаної деревини допомагає компенсувати брак свіжої сировини, що особливо актуально в Україні, де ресурси є обмеженими. Це сприяє збереженню лісів і підвищує ефективність деревообробної галузі. Особливості ріпаку як сировини для деревинних композиційних матеріалів наступні: хімічний склад ріпакової сировини відмінний від деревини: порівняно з деревиною ріпак містить більше геміцелюлоз, золи і кремнезему та менше лігніну; ріпакова сировина морфологічно більш складна і менш однорідна, ніж деревина; ріпакові частинки гідрофобніші, ніж деревинні; міцнісні властивості ріпаку набагато нижчі порівняно з деревиною.

Аналіз наукових праць. Наукові дослідження показують значний потенціал використання вживаної деревини у різних технологіях перероблення [9, 18] та біомаси для створення деревинних композитів і конструкційних матеріалів, що сприяє розвитку циркулярної економіки. Вони демонструють переваги з точки зору екології, адже дозволяють зменшити кількість відходів, уникнути спалювання деревинних залишків і знизити залежність від первинних ресурсів. У сучасних умовах принципи повторного використання матеріалів є ключовими. У Європі підхід до перероблення деревинних відходів є частиною плану дій щодо переходу до циркулярної економіки [10], спрямованого на збільшення обсягів переробки до 30% до 2030 року. Використання біомаси та вторинної деревини як наповнювачів допомагає зменшити екологічний вплив упродовж життєвого циклу матеріалів і підвищити їх економічну привабливість, особливо у виробництві легких та термоізоляційних матеріалів для будівництва та інших сфер застосування. Водночас, виклики, такі як сумісність компонентів і підвищення довговічності матеріалів, потребують наукових досліджень, технологічних інновацій та ретельної оцінки екологічного сліду кожного продукту через аналіз життєвого циклу (LCA) для зменшення негативного впливу на довкілля.

Є кілька цікавих наукових праць, що розглядають використання деревини та стебел ріпаку для створення композитних матеріалів, таких як арболіт. Дослідження підтверджують можливість застосування стебел ріпаку як альтернативної сировини, що розширює ресурсну базу та дозволяє ефективно використовувати відходи сільського господарства. Дослідження показують, що арболіт ефективно утримує тепло та сприяє природній вентиляції будівель, зменшуючи ризик утворення конденсату. Він також є прикладом ресурсозберігаючого матеріалу, оскільки для його виготовлення використовуються целюлозні залишки та промислові відходи, що знижує потребу у видобутку нової сировини. Наприклад, в роботі [19] було проаналізовано виробництво деревинних композиційних матеріалів з ріпакової сировини на основі мінерального в'язучого. Дослідження показали, що така технологія сприяє не лише зниженню собівартості матеріалів, але й підвищує їхні механічні властивості, що робить їх привабливими для використання в будівельній галузі. Вона також демонструє потенціал ріпакової сировини у виробництві стружкових плит та інших матеріалів, орієнтованих на екологічність та економію ресурсів. Такі роботи підкреслюють важливість поєднання деревинних відходів із сільськогосподарською сировиною для створення стійких і доступних матеріалів, зокрема в контексті виробництва арболіту, який може використовуватися у будівництві через його легкість та теплоізоляційні властивості.

Наукові дослідження в Україні активно розглядають використання вживаної деревини у виробництві деревинностружкових плит (ДСП) [1, 2, 4, 11, 12, 17, 18]. Однією з ключових тем є оптимізація технологій для зменшення втрат сировини та впровадження екологічно чистих клеючих речовин. Зокрема, аналізуються властивості старої деревини та її здатність забезпечувати належну міцність і стабільність плит. Також розробляються методи комбінування різних типів деревинних відходів для створення нових матеріалів із поліпшеними характеристиками, зменшуючи потребу у свіжій деревині. Проблема утилізації вживаної деревини та залишків сільськогосподарських культур, зокрема стебел ріпаку, набуває дедалі більшої актуальності через зростання обсягу відходів і необхідність сталого управління ресурсами. Інтеграція цих матеріалів у виробництво композитів, як-от арболіт, може стати ефективним рішенням для зменшення екологічного навантаження та оптимізації використання вторинної сировини. Тому, дослідження та аналіз властивостей ріпакової сировини та параметрів ріпакових частинок як наповнювача композиційних матеріалів, створює певні передумови застосування ріпакової сировини у виробництві деревинних композиційних матеріалів на основі мінерального в'язучого без суттєвих змін у технології останніх.

Мета і завдання. Мета роботи – встановити закономірності впливу технологічних параметрів на властивості деревинних композиційних матеріалів з використанням ріпакових відходів. **Основні завдання:** встановити можливість і доказати доцільність використання ріпаку у виробництві деревинних композиційних матеріалів на основі мінерального в'язучого; вивчити властивості ріпаку та визначити розміри і фракційний склад подрібнених ріпакових частинок; дослідити вплив складу арболітової суміші, а саме вмісту ріпакової сировини, кількості цементу на фізико-механічні властивості композиційних матеріалів.

Методика та матеріали. Дослідження проводилися за двома напрямками. Перший напрямок дослідження був направлений на визначення впливу співвідношення ріпакових і деревинних частинок у деревинно-цементній композиції на фізико-механічні властивості арболіту. Другий напрямок досліджень був присвячений визначенню впливу фракції ріпакових часток на фізико-механічні показники арболіту. При цьому виготовлявся арболіт марки М25, як найбільш поширений у будівництві. Компонентний склад арболітової суміші підбирався згідно існуючих норм витрат для арболіту, виготовленого з деревинного наповнювача.

Для виконання досліджень використовувались такі матеріали: деревинні частинки, які використовуються у промисловому виготовленні арболіту; біомаса – відходи ріпакової сировини, виготовлені шляхом подрібнення на лопатевій дробарці, яка використовується для подрібнення органічних матеріалів; портландцемент марки М 400; затверджувач (хлорид кальцію); вода технічна та дистильована; фільтрувальний папір. Після подрібнення частинки сортувалися на відповідні фракції, щоб відокремити великі частинки і порошок. Фракційний склад ріпакових частинок визначався шляхом фракційного аналізу. Розміри частинок вимірювали за допомогою індикаторного товщиноміра і штангенциркулів і мікрометра. Довжину частинок визначали з точністю до 0,1 мм, ширину – до 0,02 мм, товщину – до 0,01 мм. Сформовані зразки витримувалися у формах протягом 1 доби. Після цього їх виймали із форм і витримували у термокамері за температури 40 °С протягом 24 години, пізніше їх витримували ще 10 днів за нормальних умов.

Потім зразки досліджували на водопоглинання, набрякання за товщиною та на міцність при статичному згині та на стиск. Для проведення подальших досліджень з виготовленого матеріалу вирізались експериментальні зразки відповідних розмірів для визначення механічних властивостей. Виготовлені зразки нумерувались і випробовувались відповідно до ДСТУ Б В.2.7-82-99. Перед випробуванням визначалися розмірні і вагові показники. Визначення властивостей деревинних композиційних матеріалів здійснювали після 12 діб з дня витримки виробу.

Результати. Залежність межі міцності матеріалу на стиск від вмісту ріпакових частинок показано на рис.1. Як видно з графіка при збільшенні вмісту ріпакових частинок межа міцності на стиск зменшується. Такий характер пояснюється тим, що міцність ріпакових частинок менша за міцність деревинних частинок, а це впливає і на міцність матеріалу.

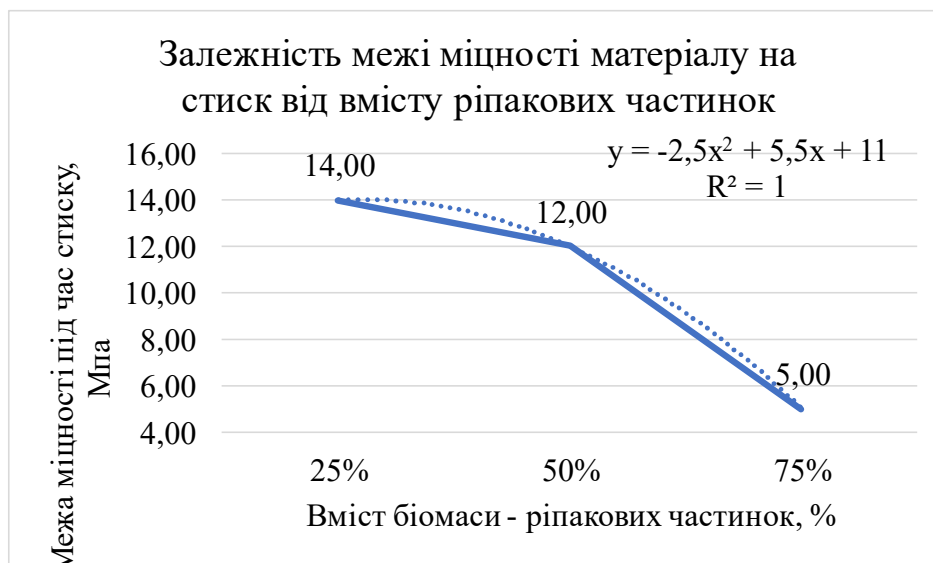


Рис.1. Залежність межі міцності арболіту на стиск від вмісту ріпакових частинок

Залежність межі міцності матеріалу на статичний згин від фракції ріпакових частинок показано на рис. 2. Дана залежність має характер близький до лінійного.

Зменшення розмірів ріпакових частинок спричиняє зростання межі міцності на стиск. Це пояснюється тим, що менші частинки краще перемішуються з цементом, краще упаковуються при формуванні виробу, а також спостерігається деяке проникнення цементного молочка у поверхневий шар частинки, а це спричиняє часткове модифікування шляхом цементації поверхневого шару і змішування виробу в цілому.

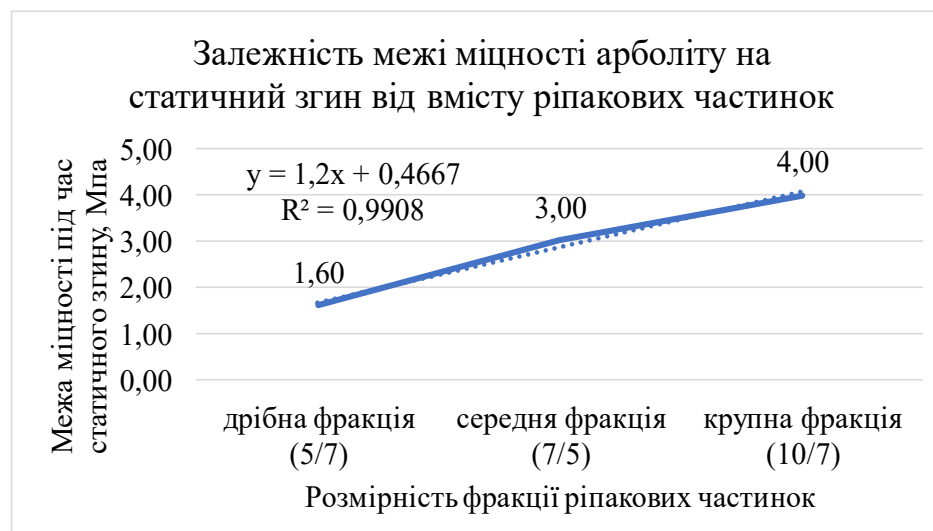


Рис. 2. Залежність межі міцності арболіту на статичний згин від фракції ріпакових частинок.

Залежність водопоглинання плит від вмісту у них ріпакової сировини показана на рис. 3.

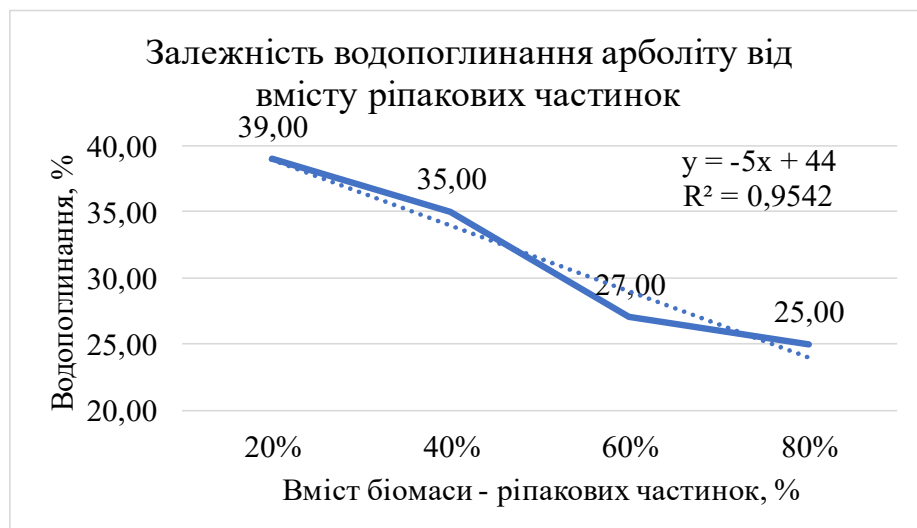
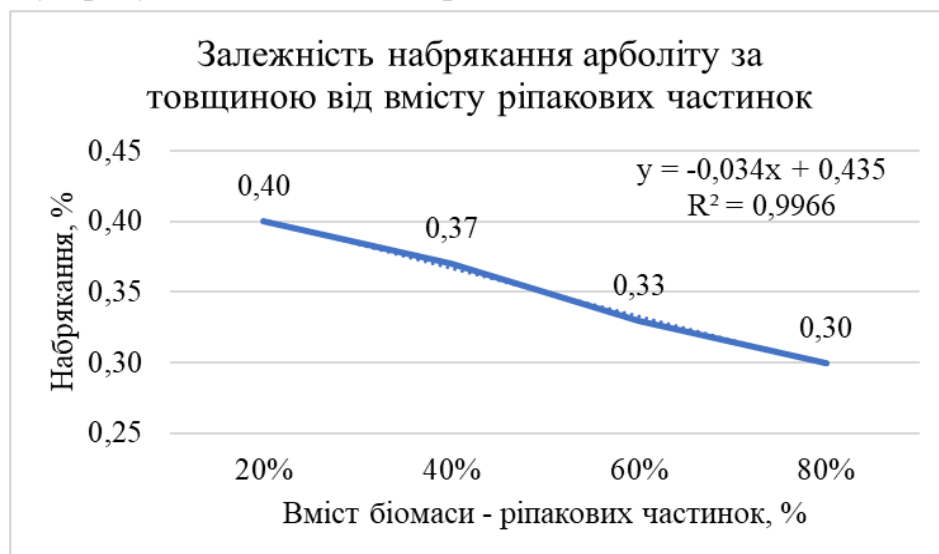


Рис. 3. Залежність водопоглинання арболіту від вмісту ріпакової сировини

Як видно з графіка при збільшенні вмісту ріпакової сировини водопоглинання арболіту зменшується. Ця залежність близька до

лінійної. Така закономірність пояснюється тим, що при збільшенні вмісту ріпакових частинок пористість матеріалу зменшується, оскільки стебла ріпаку маючи меншу порівняно з деревиною твердість і жорсткість, спресовуються під дією тиску пресування. Частина пор заповнюється цементним молочком.



Подібна закономірність спостерігається і при визначенні впливу вмісту ріпакової сировини на набрякання за товщиною ДКМ (рис. 4), однак спадання цього параметра при збільшенні вмісту ріпакової сировини є менш інтенсивне.

Рис. 4. Залежність набрякання арболіту від вмісту ріпакової сировини

Встановлено, що графічна залежність має лінійний характер. При цьому інтенсивність зміни вихідного параметра є незначною. Тобто набрякання арболіту під час збільшення вмісту ріпакової сировини зменшується мінімально, це пояснюється тим, що цементний каркас втримує частинки, компенсуючи напруження деформації. Деревні частинки мають більшу здатність до набрякання, тому що у них каркас жорсткіший і ці частинки більше здатні до деформації, а ріпакові частинки мають менш жорсткіший каркас і тому вони менше здатні до набрякання.

Практичні рекомендації. Розширення сировинної бази для виготовлення арболіту із біомаси, зокрема за рахунок використання аграрних відходів (наприклад, стебел ріпаку) та деревинних залишків, вимагає дотримання певних умов для забезпечення ефективності та якості виробництва. Основні умови такого розширення наступні: забезпечення стабільного постачання сировини від логістичних ланцюгів для безперебійної доставки як деревинних залишків, так і біомаси до належного зберігання для уникнення псування; розроблення нових технологій

виготовлення композитів із вживаної деревини та ріпаку потрібні спеціальні технології подрібнення та очищення, які мінімізують сторонні домішки – ефективно поєднання цих матеріалів із в'язкими речовинами, такими як цемент, також потребує нових підходів до підготовки та змішування компонентів; покращення екологічних властивостей матеріалів, зокрема через використання біомаси у виробництві арболіту, що сприяє зменшенню викидів парникових газів та мінімізації спалювання відходів; інвестиції для розширення сировинної бази шляхом створення економічних стимулів для підприємств, які використовують біомасу.

Висновки. Отримано результати, які забезпечують встановлення закономірностей впливу технологічних параметрів на властивості деревинного композиційного матеріалу, що виготовлений з використанням відходів ріпаку. Обґрунтовано основні чинники, що впливають на міцність матеріалу, зокрема, це вміст водорозчинних речовин у лігноцелюлозному наповнювачі, адгезія наповнювача до цементного в'язучого, міцність наповнювача, активність цементу і його витрата на 1 м³ цього матеріалу. Вияснено, що підвищений вміст мінеральних речовин у стеблах ріпаку має позитивний вплив на адгезію з мінеральними в'язучими. З'ясовано, що наявність високопористої внутрішньої паренхімної тканин у стеблах ріпаку робить можливим його використання за вмістом більше 35% у стружковій масі для виготовлення теплоізоляційних деревинних композиційних матеріалів на основі мінерального в'язучого. Експериментально доведено, що деревинні композиційні матеріали, виготовлені за звичайною технологією, з додаванням у композиційні матеріали деревинних частинок до 35% ріпакових частинок мають механічні показники, що відповідають вимогам державного стандарту ДСТУ EN 312-2:2003. Запропоновано способи виготовлення композиційних матеріалів на основі мінерального в'язучого з використанням відходів ріпаку, які дають змогу розширити сировинну базу для виготовлення цих матеріалів завдяки залученню відходів сільськогосподарського виробництва – ріпакової сировини, зменшити собівартість арболіту і, відповідно, зекономити цінну на деревинну сировину.

References

1. **Bekhta P.A.** (2003). Технологія деревинних композиційних матеріалів / Technology of wood composite materials. Kyiv: Osnova. – 336 p. in Ukrainian).
2. **Bekhta P.A.** (2004). Технологія деревинних плит і пластиків / Technology of wooden plates and plastics. Kyiv: Osnova, – 780 p. (in Ukrainian).
3. **Bytko M.M., Boyko V.V., Arkhangelska N.O.** (2008). Арболіт – прогресивний будівельний матеріал сучасності / Arbolit is a progressive modern building material. Bulletin of ChSTU 4:76-78. (in Ukrainian).
4. **Gayda S.V.** (2000): Матеріали для виготовлення виробів з деревини / Materials for the Production of wood Productss. Lviv: BMC. – 160 p. (in Ukr.).
5. **Gayda S.V.** (2007): A problem of arboreal raw material is in Europe and Ukraine. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 33:55-63 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42073312>
6. **Gayda S.V.** (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. doi: <https://doi.org/10.36930/421137221>
7. **Gayda S.V.** (2013): Основи формування класифікатора вторинних деревинних ресурсів / *Osnovy formuvannya klasyfikatora vtorynnykh derevyunnykh resursiv* [Bases of secondary wood resources classifier formation]. *Scientific Works of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine* 11:208-215 (in Ukrainian).
8. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). Bulletin of KhNTUA 197:3-9, (in Ukrainian).
9. **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).
10. **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).
11. **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>

12. Gayda S.V. (2024). Analysis of the trend of the main indicators of the wood processing industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 4-15 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245001>
13. Gayda S.V., Kiyko O.A. (2018). Shape stability as a quality criterion for PCW-made blockboards. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 17, 185-192. <https://doi.org/10.15421/411834> (in Ukrainian)
14. Gayda S.V., Kiyko O.A. (2021). Властивості вживаної деревини як визначальний чинник якості меблевих виробів / *Vlastyvosti vzhyyvanoyi derevyny yak vyznachal'nyy chynnyk yakosti meblevykh vyrobiv* [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). <https://doi.org/10.15421/412135>
15. 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>.
16. 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>
17. Gayda S.V., Maksymiv V.M. From recycled post-consumer wood towards prime quality particleboard / Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть // міжвід. наук.-техн. зб. – Львів: НЛТУ України. – 2010, вип. 36. – С. 57-77. doi: <https://doi.org/10.36930/42103610>
18. Gayda S.V., Nikityuk L.O. (1998). До питання застосування екстрагованої деревини для плитного виробництва [On the issue of using extracted wood for slab production]. *Scientific Bulletin of UNFU* 8:75-77. (in Ukrainian).
19. Kopanskyi M.M. (2014). Production of wood-based composites made from rape straw wastes. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 40: 20-22.
20. Гайда С.В., Максимів В.М., Кійко О.А., Ференц О.Б. Залишки деревини та деревина після споживання. Класифікація. Терміни та визначення / Договір № 08.24-11-1: проект міжнародного стандарту ISO. – Львів: НЛТУ України. – 2013. – 53 с.

UDC 674-419.33:674.8

Assoc. prof. M.M. Kopanskyi, PhD

of Technical Sciences; prof. R.O. Kozak, Doctor of Technical Sciences; assoc. prof.

I.I. Kusniak, PhD of Technical Sciences – UNFU

CHARACTERISTICS OF WOOD COMPOSITES BASED ON ROPE STEM AND MINERAL BINDER

The dependence of the physical and mechanical characteristics of arbolite products on the specific content of rapeseed particles and mineral binder in the original composition was established. The results were obtained, which ensure the establishment of patterns of influence of technological parameters on the properties of wood composite material made using rapeseed waste. The main factors affecting the strength of the material are substantiated, in particular, the content of water-soluble substances in the lignocellulosic filler, the adhesion of the filler to the cement binder, the strength of the filler, the activity of cement and its consumption per 1 m³ of this material. It was found that the increased content of mineral substances in rapeseed stalks has a positive effect on adhesion with mineral binders. It was found that the presence of highly porous internal parenchyma tissue in rapeseed stalks makes it possible to use it with a content of more than 35% in the chip mass for the production of heat-insulating wood composite materials based on a mineral binder. It has been experimentally proven that wood composite materials made by conventional technology, with the addition of wood particles to the composite materials up to 35% of rapeseed particles, have mechanical indicators that meet the requirements of the state standard DSTU EN 312-2:2003. Methods of manufacturing composite materials based on mineral binder using rapeseed waste are proposed, which make it possible to expand the raw material base for the production of these materials thanks to the involvement of biomass of agricultural production – rapeseed raw material, reduce the cost of arbolite and, accordingly, save valuable wood raw materials.

Keywords: biomass, post-consumer wood, rapeseed particles, arbolite, binder, composition, technology, strength, gluing, adhesion, recycling, residues, waste, circular economy, economic efficiency.

ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІКИ УТВОРЕННЯ ДЕРЕВИННИХ ЗАЛИШКІВ ТА ВІДХОДІВ ВИРОБНИЧОЇ ДІЯЛЬНОСТІ НА ТзОВ «Фортуна-Меблі»

Виконано порівняльний аналіз динаміки утворення залишків та відходів від перероблення деревинних та композитних конструкційних матеріалів на заготовки на меблевому підприємстві ТзОВ «Фортуна-меблі» за три роки (2022-2024 рр.). Детально проаналізовано динаміку обсягів накопичень відходів та залишків від перероблення букової деревини та конструкційних матеріалів: MDF плит, деревинностружкових плит та фанери. Встановлено, що протягом трирічного періоду на даному підприємстві спостерігалось стабільне зменшення загальної кількості відходів та залишків на підприємстві, що свідчить про успішні заходи з оптимізації виробничих процесів. Загальна кількість відходів та залишків на підприємстві показала 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. Виявлено, що 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. Визначено зменшення обсягів тирси та стружки. 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. Обґрунтовано, що зменшення обсягів відходів сприяє зниженню витрат на їх утилізацію, покращенню екологічного іміджу підприємства та підвищенню його конкурентоспроможності на ринку.

Ключові слова: деревина, вживана деревина, деревинні залишки, деревинні відходи, конструкційні матеріали, фанера, деревинностружкова плита, MDF плита, технологія, перероблення, утилізація, циркулярна економіка.

Вступ. У сучасних умовах глобальної екологічної кризи та зростаючих вимог до сталого розвитку підприємств, принципи циркулярної економіки набувають все більшої актуальності [5, 9, 15, 16, 23, 30, 33, 34, 38]. Особливо це стосується галузей, що працюють з природними ресурсами, таких як меблеве виробництво. Одним із ключових аспектів впровадження циркулярної економіки у меблевій промисловості є ефективний облік деревинних залишків та відходів оброблення деревини [1, 2, 5, 15, 19, 29, 31, 43, 44]. Облік деревинних залишків та відходів оброблення деревини у меблевому виробництві є ключовим елементом впровадження принципів циркулярної економіки. Це не лише сприяє зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище [5, 15, 17, 18, 37, 38], але й підвищує економічну ефективність, покращує репутацію підприємства та сприяє його кон-

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 – член-кореспондент 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

курентоспроможності. Впровадження ефективних методів обліку та управління відходами є необхідним кроком до сталого розвитку меблевої промисловості та забезпечення її довгострокового успіху.

Актуальність обліку деревинних залишків та відходів полягає у наступному [2, 5, 7, 17, 18, 19, 23, 26, 31, 37, 38]: ефективний облік дозволяє зменшити витрати на утилізацію відходів та оптимізувати процеси виробництва; використання залишків як сировини для виробництва вторинних продуктів може створювати додаткові джерела доходу; мінімізація відходів сприяє зменшенню викидів парникових газів та забруднення; оптимальне використання деревини дозволяє зменшити вирубку лісів та зберегти біорізноманіття; компанії, що впроваджують принципи циркулярної економіки, отримують позитивний імідж серед споживачів та партнерів; дотримання екологічних стандартів та законодавства щодо утилізації відходів; використання відходів для розробки інноваційних товарів сприяє підвищенню конкурентоспроможності на ринку; впровадження сучасних технологій для обліку та перероблення відходів сприяє підвищенню ефективності виробництва [9, 12, 15, 21, 22, 23, 27].

Проблема обліку деревинних залишків та відходів у меблевому виробництві є складною та багатогранною. Вона охоплює як технічні, так і організаційні аспекти управління деревинними ресурсами [5, 8, 9, 15, 25, 29, 30, 36, 43, 44]. Ефективне вирішення цих проблем вимагає комплексного підходу, включаючи впровадження стандартів, інвестування в технології, підвищення кваліфікації персоналу та розвиток партнерств. Успішне подолання викликів у сфері обліку відходів не лише сприятиме економічній ефективності підприємств, але й зробить вагомий внесок у збереження навколишнього середовища та сталий розвиток меблевої промисловості. Незважаючи на зростаючу увагу до принципів циркулярної економіки та сталого розвитку, підприємства стикаються з низкою проблем, що ускладнюють ефективне управління відходами. Ці проблеми можуть негативно впливати як на економічну діяльність компаній, так і на екологічну ситуацію в цілому. Основні проблеми обліку деревинних залишків та відходів [2, 5, 21, 23, 31, 37, 38] є такими: багато підприємств не мають єдиних стандартів або процедур для обліку відходів, що призводить до невідповідності даних та ускладнює їх аналіз; використання різних програмних забезпечень або ручних методів обліку створює труднощі у порівнянні та інтеграції даних; працівники не завжди мають необхідні знання та навички для ефективного обліку відходів; деякі із підприємств не усвідомлюють, наскільки ефективний облік може сприяти зниженню витрат та підвищенню прибутковості; недостатня кількість кваліфікованих працівників для ведення детального обліку відходів; відходи можуть мати різні властивості та призначення, що ускладнює їх класифікацію та облік.

Накопичення деревинних залишків та відходів оброблення деревини як меблевому виробництві, так і вживаних виробів із деревини [6, 13, 15, 20, 24, 25] є серйозною екологічною проблемою, яка має суттєвий вплив на сталий розвиток галузі та довкілля. Для вирішення цієї проблеми необхідний комплексний підхід, що включає впровадження сучасних технологій [4, 7, 9, 11, 14, 27, 29, 32, 33, 34, 36, 39, 40], розвиток систем циркулярної економіки, підвищення екологічної свідомості та підтримку державної політики. Ефективне управління деревинними відходами не лише сприятиме збереженню природних ресурсів та покращенню еко-

логічної ситуації, але й забезпечить економічну стабільність та конкурентоспроможність меблевого виробництва на довгострокову перспективу.

Деревинні залишки та відходи, що утворюються в процесі оброблення деревини у меблевому виробництві, є важливим аспектом екологічного та економічного управління підприємствами. Розуміння характеристик цих відходів [9, 15, 19, 37, 38, 43, 44] дозволяє ефективніше їх обробляти, переробляти та використовувати повторно, що сприяє зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище та підвищенню економічної ефективності виробництва.

Аналіз літературних джерел. Меблеве виробництво охоплює широкий спектр продукції, кожен тип якої характеризується специфічними виробничими процесами, матеріалами [1, 3, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 15, 17, 18, 20, 22, 28, 30, 35, 41, 42] та технологіями обробки деревини [11, 15, 21, 22, 26, 27, 32, 33, 39, 40]. Відповідно, характер деревинних залишків та відходів [9, 15, 19, 37, 38, 43] суттєво варіюється залежно від типу виробів. Розуміння цих відмінностей є ключовим для ефективного управління відходами, оптимізації виробничих процесів та впровадження принципів циркулярної економіки [15, 16, 18, 23, 30, 33, 34].

Ефективне управління деревинними залишками та відходами оброблення деревини у меблевому виробництві починається з їх правильної класифікації [5, 15, 19, 25, 37, 38]. Класифікація дозволяє систематизувати відходи за різними критеріями, що полегшує їх подальше оброблення, переробку та повторне використання [3, 6, 7, 8, 20, 22, 28, 30, 35, 41, 42]. Класифікація додаткових деревинних ресурсів, таких як вживана деревина, деревинні залишки та післяпродукційні відходи, є важливим аспектом управління ресурсами в меблевій промисловості.

Тому, облік деревинних залишків та відходів оброблення деревини у меблевому виробництві є важливою темою в контексті екологічного управління та сталого розвитку. Наукові дослідження в цій галузі зосереджені на розробці методів ефективного обліку, перероблення та повторного використання відходів, а також на оцінці їхнього впливу на навколишнє середовище [12, 15, 16, 29, 31, 36] та економіку підприємств. Вчені по-різному висвітлюють різні аспекти обліку деревинних залишків та відходів у меблевій промисловості та розглядають різні методи обліку деревинних відходів, включаючи ручні та автоматизовані системи. Оцінюється ефективність кожного методу в контексті зменшення витрат на утилізацію [4, 7, 12, 16, 26, 29] та підвищення екологічної відповідальності підприємств.

Окремі статті [16, 19, 24, 38] присвячені впровадженню принципів циркулярної економіки у меблевому виробництві. Автори аналізують шляхи перероблення деревинних відходів [6, 9, 15, 20, 28, 30, 33] та їх використання як вторинної сировини для створення нових продуктів, а також вплив таких практик на сталий розвиток підприємств. Деякі статті присвячені екологічним аспектам управління деревинними відходами, включаючи методи їх утилізації та перероблення [7, 12, 21, 29, 35]. Розглядаються впливи на екосистеми та пропонуються рекомендації щодо зменшення негативного впливу відходів на довкілля.

Гама наукових праць присвячені вживаній деревині як додатковому ресурсу в меблевої галузі [5, 8, 9, 15, 25, 29, 30, 36]. Автори аналізують різні типи вживаної деревини, їх класифікацію та можливості повторного використання у виробництві нових меблів, а також розглядають економічні переваги такого підходу. У статтях [5, 19, 37] розглядаються різні підходи до систематизації деревинних за-

лишків, включаючи класифікацію за типом деревини, ступенем обробки та можливістю повторного використання. У дисертаційній роботі [15] аналізується екологічний аспект управління вживаною деревиною, включаючи методи її класифікації та перероблення. Автор розглядає вплив правильного управління вживаною деревиною на зменшення екологічного навантаження та збереження природних ресурсів. Тому дослідження, що базуються на аналізі утворення деревинних залишків та відходів у меблевому виробництві та на ефективній класифікації додаткових деревинних ресурсів, є важливими у розвитку ефективних стратегій управління ресурсами та зменшенні екологічного впливу галузі. Вивчення динаміки утворення відходів, що є в основі цих досліджень, дозволить підприємствам меблевої промисловості впроваджувати передові методи класифікації та перероблення відходів, сприяючи сталому розвитку та підвищенню економічної ефективності. Використання сучасних технологій, розроблення нових класифікаційних систем та постійне навчання персоналу є важливими факторами для успішного управління додатковими деревинними ресурсами.

Мета роботи – порівняльний аналіз динаміки утворення залишків та відходів від перероблення деревинних та композитних конструкційних матеріалів (букової деревини та конструкційних матеріалів: MDF плит, деревинностружкових плит та фанери) на заготовки на меблевому підприємстві ТзОВ «Фортуна-меблі» за три роки (2022-2024).

Об’єкт дослідження – деревинні залишки та деревинні відходи.

Предмет дослідження – трирічні обсяги утворення залишків та відходів від перероблення деревинних та композитних конструкційних матеріалів: букової деревини та конструкційних матеріалів – MDF плит, деревинностружкових плит та фанери на меблевому підприємстві ТзОВ «Фортуна-меблі».

Основні завдання:

1. Визначення обсягів утворення залишків та відходів від перероблення деревинних та композитних конструкційних матеріалів: букової деревини та конструкційних матеріалів – MDF плит, деревинностружкових плит та фанери за трирічний період з 2022 по 2024 рр.

2. Порівняльний аналіз динаміки утворення залишків та відходів від перероблення деревинних та композитних конструкційних матеріалів на меблевому підприємстві ТзОВ «Фортуна-меблі»

3. Розроблення практичних рекомендацій щодо розроблення та впровадження ефективних стратегій управління відходами, спрямованих на мінімізацію їх обсягів, оптимізацію використання ресурсів, підвищення екологічної відповідальності та збереження навколишнього середовища для майбутніх поколінь.

Методика та матеріали. Суть аналізу накопичень деревинних залишків та відходів оброблення деревини меблевого виробництва – це аналіз утворення деревинних залишків та відходів оброблення деревини у меблевому виробництві, що є фундаментальним етапом управління ресурсами та екологічної відповідальності підприємств. Цей аналіз дозволяє не лише визначити обсяги та види утворених відходів, але й ідентифікувати їх джерела, оцінити вплив на навколишнє середовище та розробити ефективні стратегії їх мінімізації та перероблення. Суть аналізу полягає в систематичному дослідженні процесів утворення відходів з метою оптимізації виробничих процесів та впровадження принципів циркулярної

економіки. Методика обліку деревинних залишків та відходів оброблення деревини у меблевому виробництві, розроблена з урахуванням принципів циркулярної економіки, забезпечує систематичний підхід до управління ресурсами та мінімізації екологічного впливу.

Основні компоненти аналізу накопичень залишків та відходів:

- Типи відходів: стружка, тирса, обрізки дощок, рейки, дерев'яні планки та відрізки плит, пошкоджені заготовки, браковані вироби тощо.
- Походження відходів: аналіз джерел утворення відходів на різних етапах виробничого процесу (розпилювання, стругання, складання, фінішна обробка).
- Обсяги відходів: вимірювання та облік кількості утворених відходів за певний період часу (день, місяць, рік).
- Тенденції утворення: вивчення змін у кількості відходів залежно від виробничих обсягів, сезонних коливань та впровадження нових технологій.

Аналіз динаміки накопичень деревинних залишків та відходів у меблевому виробництві за трирічний період є важливим інструментом для оцінки ефективності управління відходами, визначення тенденцій утворення відходів та розробки стратегій їх мінімізації. Цей аналіз дозволяє підприємству зрозуміти, як змінюються обсяги та типи відходів з часом, а також виявити ключові фактори, що впливають на ці зміни. У даному дослідженні використано методи збору та обробки даних, що представлені у вигляді результати аналізу, опису тенденцій та факторів, що впливають на накопичення відходів, а також надаються рекомендації для оптимізації процесів управління відходами.

Результати. Аналіз динаміки утворення деревинних залишків та відходів є важливим аспектом управління ресурсами на меблевому підприємстві. Ефективне управління відходами не тільки сприяє зменшенню витрат, але й покращує екологічний імідж компанії. Зміни у кількості різних видів відходів від перероблення деревини бук на даному підприємстві протягом 2022-2024 рр. у табл. 1.

Таблиця 1. Динаміка накопичення деревинних залишків та відходів від перероблення твердолистяної породи бук, м³

Різновиди залишків та відходів	2022	2023	2024
Річні обсяги	47,67	27,49	26,17
Залишки тверді – обрізки	30,26	17,45	16,61
Відходи м'які – тирса	9,95	5,74	5,46
Відходи м'які – стружка	7,46	4,30	4,10

Аналіз показав, що на даному підприємстві спостерігається суттєве зменшення загальної кількості залишків та відходів від перероблення деревини бук на меблеві заготовки (рис. 1). За період з 2022 по 2023 рік відходи із цієї породи деревини знизилися на приблизно 42%, а з 2023 по 2024 рік – ще на 5%. Зменшення твердих залишків може свідчити про покращення процесів обробки деревини або впровадження більш ефективних технологій виробництва. Зменшення кількості тирси може бути пов'язано з оптимізацією процесів пиляння або розкрою, а також використання її для інших цілей. Зменшення кількості стружки може бути результатом впровадження більш ефективних технологій обробки деревини або збільшення використання матеріалів.

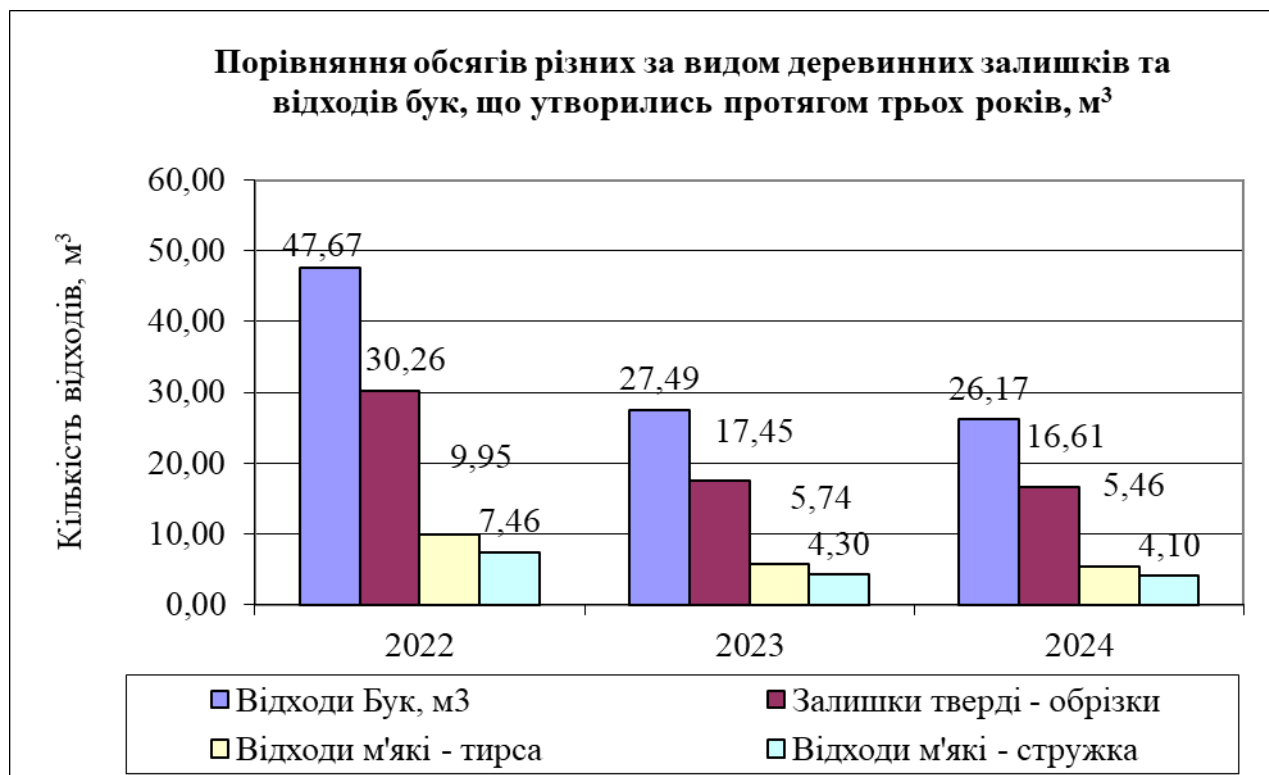


Рис. 1. Динаміки утворення букових деревинних залишків та відходів

Аналіз динаміки утворення залишків та відходів від перероблення фанери та фанерних плит на заготовки на даному підприємстві протягом 2022-2024 рр. подано у табл. 2.

Таблиця 2. Динаміка накопичення деревинних залишків та відходів від перероблення фанери та фанерних плит, м³

Різновиди залишків та відходів	2022	2023	2024
Річні обсяги	2,54	5,53	0,88
Залишки тверді – обрізки	1,80	3,92	0,62
Відходи м'які – тирса	0,63	1,37	0,22
Відходи м'які – стружка	0,11	0,24	0,04

Аналіз показав, що на даному підприємстві спостерігається суттєве збільшення відходів фанери з 2,54 м³ у 2022 р. до 5,53 м³ у 2023 р., а потім значне зменшення до 0,88 м³ у 2024 р. (рис. 2). Це може бути обумовлено змінами у виробничих обсягах, впровадженням нових технологій або удосконаленням процесів управління відходами. Подібно до загального обсягу відходів фанери, зокрема тверді обрізки збільшилися майже у два рази з 2022 по 2023 р., а потім знизилися до 0,62 м³ у 2024 р. Це може свідчити про зміну методів обробки або оптимізацію виробничих процесів, що дозволило зменшити кількість залишків. Відходи тирси також продемонстрували зростання з 0,63 м³ у 2022 р. до 1,37 м³ у 2023 р., після чого значно знизилися до 0,22 м³ у 2024 р. Це може бути пов'язано з покращенням технологій розкрійних процесів або збільшенням ефективності використання матеріалів. Стружка збільшилася з 0,11 м³ у 2022 р. до 0,24 м³ у 2023 р., а потім значно зменшилася до 0,04 м³ у 2024 р., що ймовірно є результатом впровадження більш ефективних методів обробки або збільшення можливостей повторного використання стружки.

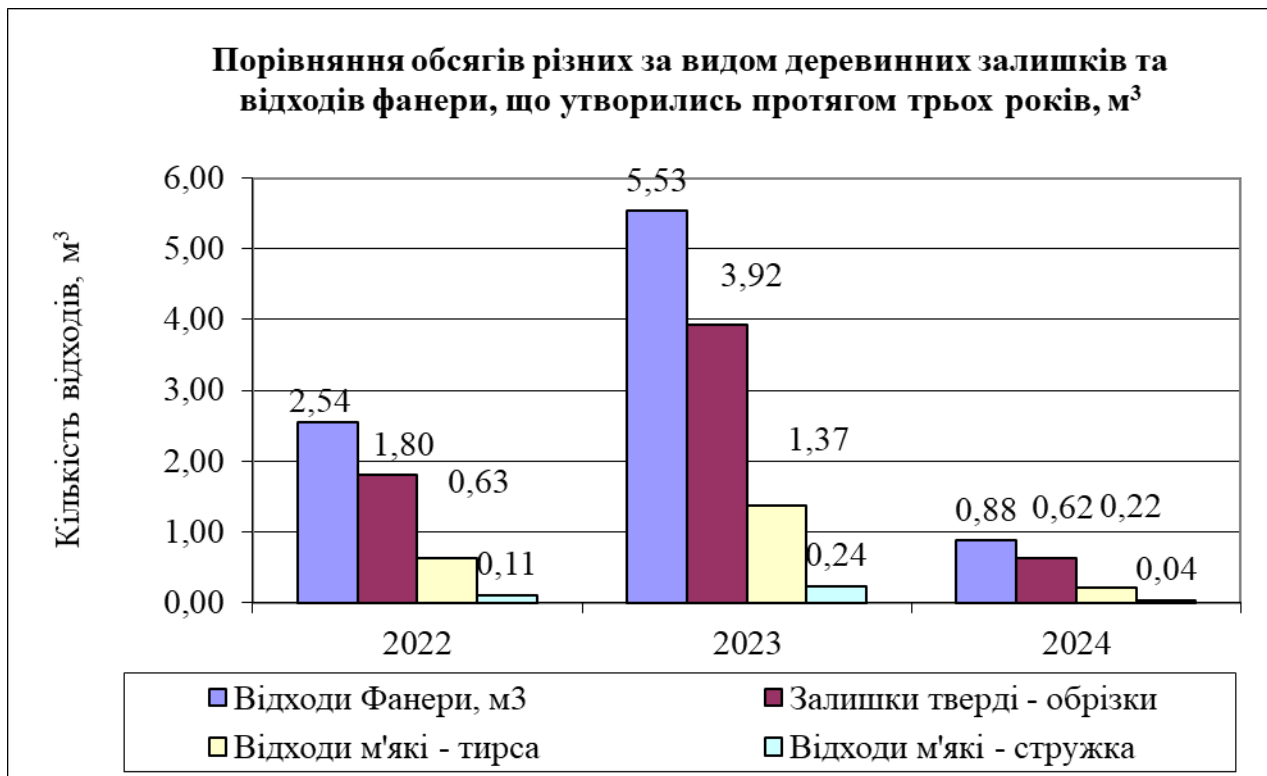


Рис. 2. Динаміки утворення деревинних залишків та відходів із фанери

Оцінка динаміки утворення залишків та відходів від перероблення MDF плит на заготовки протягом 2022-2024 рр. наведена у табл. 3.

Таблиця 3. Динаміка накопичення деревинних залишків та відходів від перероблення MDF плит, м³

Різновиди залишків та відходів	2022	2023	2024
Річні обсяги	1,53	3,23	2,05
Залишки тверді – обрізки	1,03	2,18	1,38
Відходи м'які – тирса	0,42	0,88	0,56
Відходи м'які – стружка	0,08	0,17	0,11

Аналіз відходів MDF демонструє значне їх збільшення у 2023 р. на приблизно 111% порівняно з 2022 р., та їх зменшення на близько 36% у 2024 р. (рис. 3). Це може бути пов'язано зі змінами у виробничих обсягах, впровадженням нових технологій або коливаннями в якості вихідної сировини. Подібно до загальних відходів MDF, тверді обрізки збільшилися у 2023 р. на ~111% і потім знизилися на ~37% у 2024 р. Це може свідчити про неефективність первинного етапу обробки або збільшення виробничих обсягів у 2023 р.

Відходи тирси зросли у 2023 р. на ~110% і зменшилися на ~36% у 2024 р., що є наслідком збільшення обсягів розкрійних процесів або зміни методів обробки матеріалу.

Стружка також демонструє збільшення у 2023 р. на ~112% і зменшення на ~35% у 2024 р., що є результатом підвищення інтенсивності механічної обробки, зокрема фрезерування фасадних поверхонь. Оптимізація процесів обробки MDF дозволяє зменшити витрати, підвищити продуктивність та забезпечити екологічну відповідальність компанії.

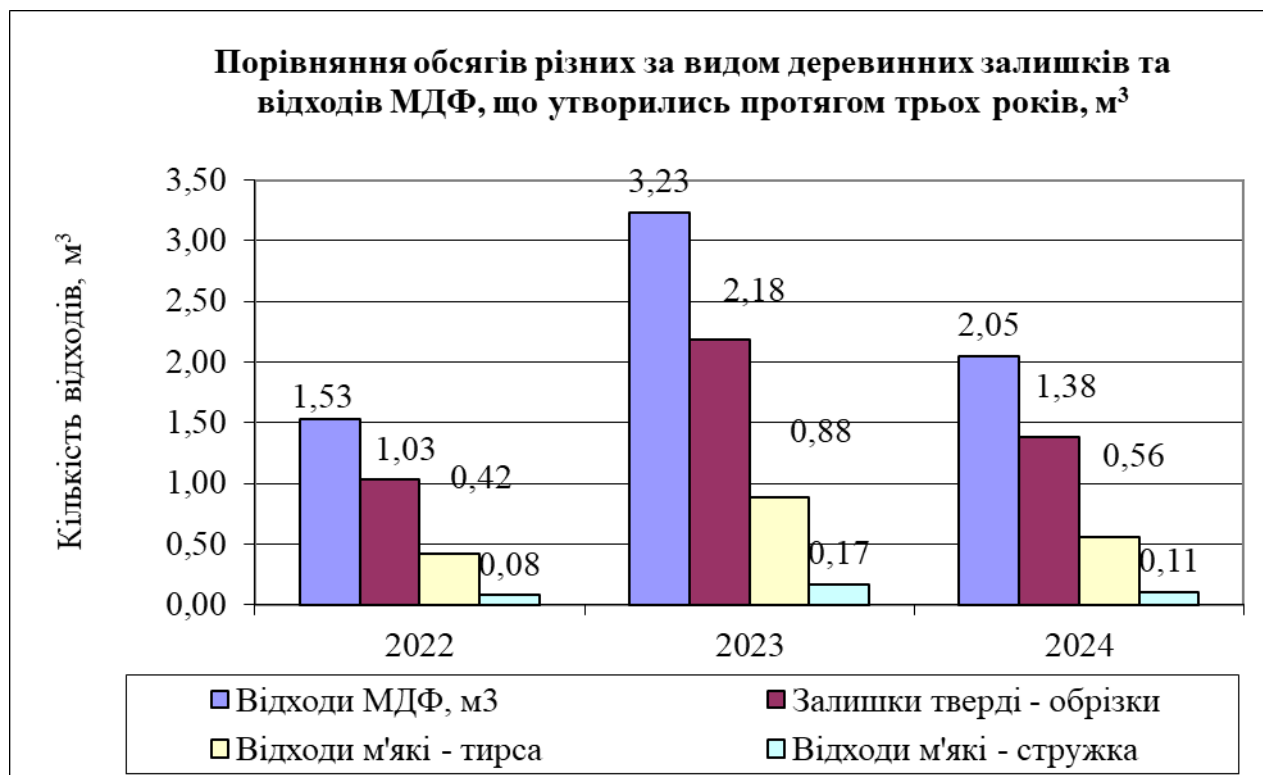


Рис. 3. Динаміки утворення деревинних залишків та відходів із MDF

Оцінка динаміки утворення залишків та відходів від перероблення ДСП на заготовки протягом 2022-2024 рр. наведена у табл. 4.

Таблиця 4. Динаміка накопичення деревинних залишків та відходів від перероблення ДСП, м³

Різновиди залишків та відходів	2022	2023	2024
Річні обсяги	3,06	15,20	1,37
Залишки тверді – обрізки	2,13	10,62	0,96
Відходи м'які – тирса	0,92	4,59	0,41
Відходи м'які – стружка	0,00	0,00	0,00

Спостерігається суттєве збільшення відходів ДСП у 2023 р. на 396% порівняно з 2022 р., після чого значне зниження до 1,37 м³ у 2024 р. (~91% зменшення), що обумовлено збільшенням виробничих обсягів у 2023 р. (рис. 4).

Аналогічно до загальних відходів ДСП, тверді обрізки збільшилися у 2023 р. на ~398% і потім знизилися на ~91% у 2024 р., що свідчить про збільшення виробничих обсягів в 2023 р., яка була виправлена у наступному році. Відходи тирси зросли у 2023 р. на ~400%, а потім значно знизилися на ~91% у 2024 р., що є наслідком збільшення обсягів розкрійних процесів у 2024 р.

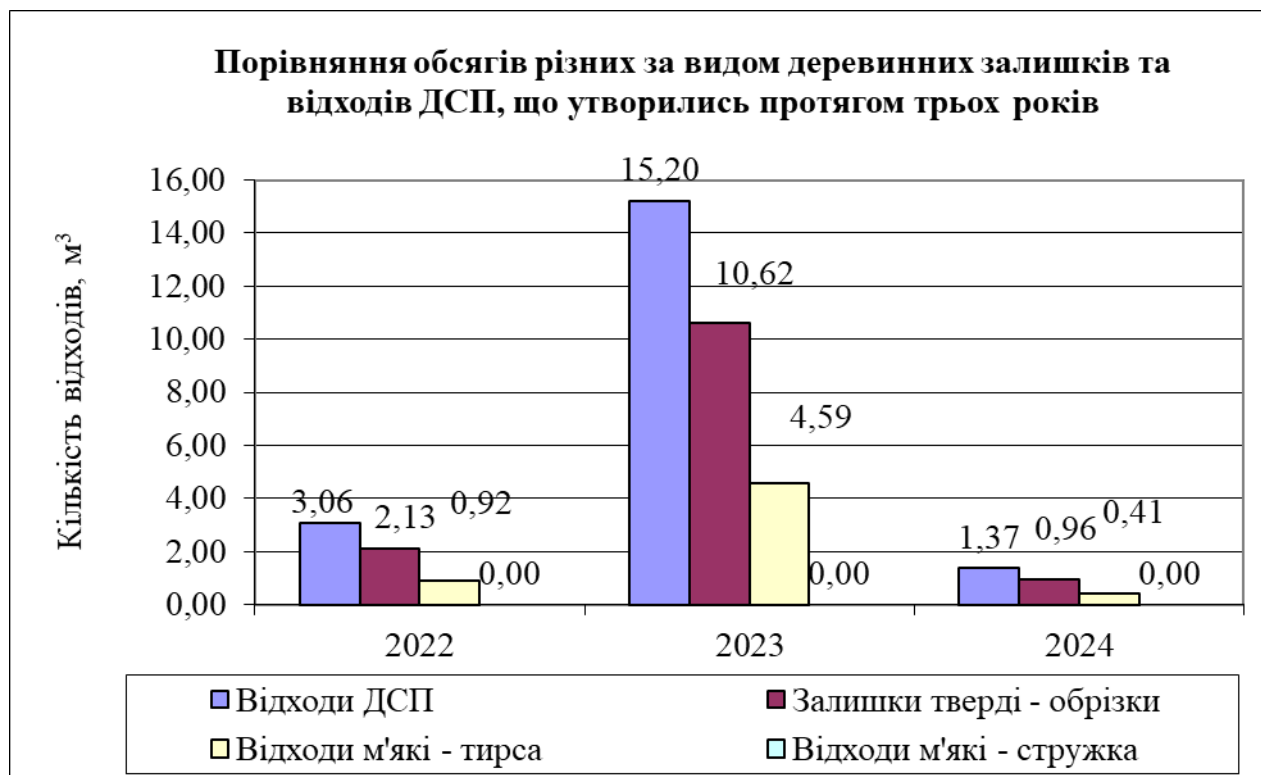


Рис. 4. Динаміки утворення деревинних залишків та відходів із ДСП

Оцінка динаміки утворення залишків та відходів від перероблення деревинних та композитних матеріалів на заготовки протягом 2022-2024 рр. наведена у табл. 5.

Таблиця 5. Динаміка накопичення деревинних залишків та відходів від перероблення деревинних та композитних конструкційних матеріалів, м³

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 (рис. 5). 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 конс-

трукційних матеріалів є критично важливим для меблевих підприємств. Оптимізація цього процесу дозволяє знизити витрати, покращити екологічну стійкість підприємства та підвищити загальну ефективність виробництва.

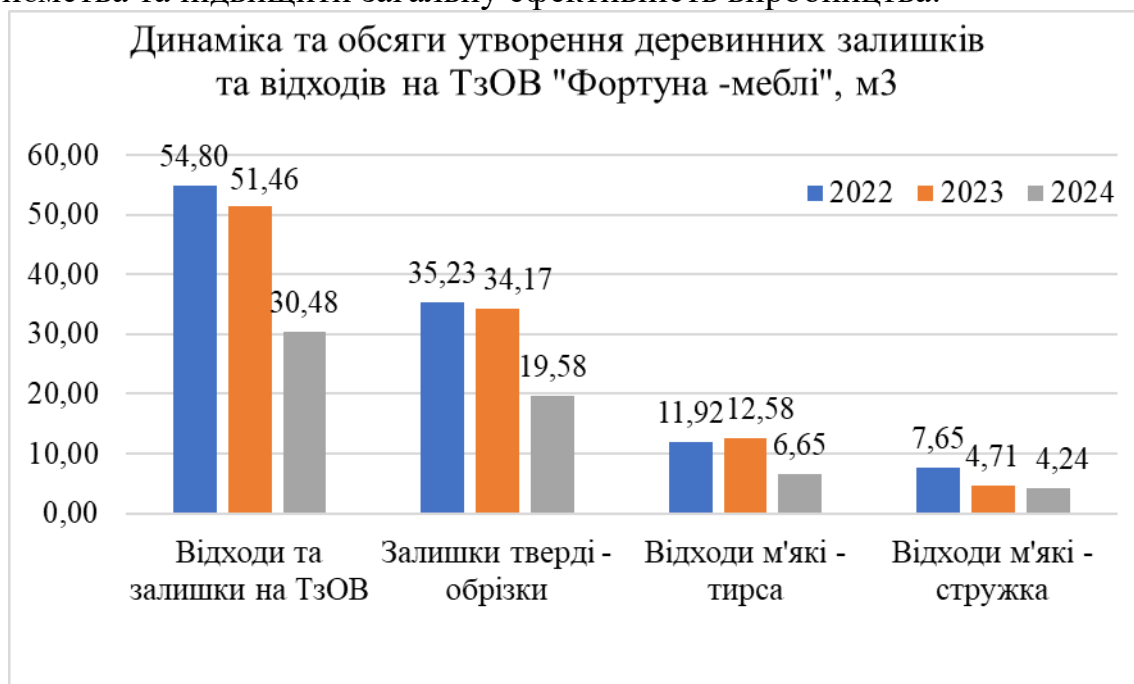


Рис. 5. Динаміки утворення обсягів деревинних залишків та відходів

Практичні рекомендації.

1. Регулярно аналізувати виробничі процеси для виявлення можливостей подальшого зменшення відходів. Впроваджувати принципи циркулярної економіки для підвищення ефективності.
2. Придбати та впровадити сучасне обладнання, яке забезпечує більш точну обробку деревинних та композитних матеріалів, мінімізуючи втрати матеріалу та утворення відходів.
3. Активно використовувати відходи тирси та обрізків для виробництва додаткових продуктів, таких як біопаливо (паливних гранул та брикетів), композити або інші вторинні матеріали, що можуть бути реалізовані на ринку.
4. Організувати навчання та тренінги для працівників з метою підвищення їхньої обізнаності щодо ефективного використання матеріалів та зменшення відходів.
5. Впровадити систему моніторингу утворення відходів у режимі реального часу для оперативного виявлення та усунення джерел надмірних відходів.
6. Налагодити тісніші відносини з постачальниками деревинних та композитних матеріалів для забезпечення високої якості сировини, що дозволить зменшити обсяги відходів від першої стадії виробництва.
7. Провести детальний аналіз факторів, які сприяли суттєвому зменшенню обсягів відходів у 2024 р., щоб використовувати ці знання для подальшого вдосконалення процесів.

Практичні рекомендації щодо перероблення вживаної деревини, деревинних залишків та післяпродукційних відходів меблевого виробництва спрямовані на забезпечення ефективного управління ресурсами, зменшення екологічного впливу та підвищення економічної ефективності підприємств. Впровадження цих рекомендацій вимагає комплексного підходу, включаючи технологічні інновації, оп-

тимізацію виробничих процесів, навчання персоналу та розвиток партнерств. Використання сучасних методів перероблення, автоматизація процесів та постійне вдосконалення систем управління відходами дозволяють підприємствам меблевої галузі досягати сталого розвитку та зберігати конкурентоспроможність на ринку.

Висновки.

1. Виконано порівняльний аналіз динаміки утворення залишків та відходів від перероблення деревинних та композитних конструкційних матеріалів на заготовки на меблевому підприємстві ТзОВ «Фортуна-меблі» за три роки (2022-2024). Детально проаналізовано динаміку обсягів накопичень відходів та залишків від перероблення букової деревини та конструкційних матеріалів: MDF плит, деревностружкових плит та фанери.

2. Встановлено, що протягом трирічного періоду на даному підприємстві спостерігалось стабільне зменшення загальної кількості відходів та залишків на підприємстві, що свідчить про успішні заходи з оптимізації виробничих процесів. Загальна кількість відходів та залишків на підприємстві показала 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.

3. Виявлено, що 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.

4. Визначено зменшення обсягів тирси та стружки. 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.

5. Обґрунтовано, що зменшення обсягів відходів сприяє зниженню витрат на їх утилізацію, покращенню екологічного іміджу підприємства та підвищенню його конкурентоспроможності на ринку.

References

1. **Gayda S.V.** (2000): Матеріали для виготовлення виробів з деревини / Materials for the Production of wood Productss. Lviv: BMC. – 160 p. (in Ukr.).
2. **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).
3. **Gayda S.V.** (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.
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): Основи формування класифікатора вторинних деревинних ресурсів / *Osnovy formuvannya klasyfikatora vtorynnykh derevyynykh resursiv* [Bases of secondary wood re-

sources classifier formation]. *Scientific Works of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine* 11:208-215 (in Ukrainian).

6. **Gayda S.V.** (2015). Modeling properties of blockboards made of post-consumer wood on the basis of the finite element method. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 41, 39-49. <https://doi.org/10.36930/42154106>

7. **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, (in Russian).

8. **Gayda S.V.** (2016). Research on physical and mechanical characteristics of front blockboards made from post-consumer wood [Дослідження фізико-механічних характеристик фасадних столярних плит із вживаної деревини]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 42: 33-50.

9. **Gayda S.V.** (2016). Технологічні підходи до поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом / *Tekhnologichni pidkhody do poverkhnevoho ochyshchennya vzhivanoyi derevyiny holkofrezernym instrumentom* [Technological approaches to cleaning of surface of post-consumer wood of needle-milling tools]. *Bulletin of KhNTUA* 178:3-11(in Ukrainian).

10. **Gayda S.V.** (2016): A investigation of form of stability of variously designed blockboards made of post-consumer wood. *ProLigno* 12(1):22-31.

11. **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 (in Russian).

12. **Gayda S.V.** (2017). Використання нечітких експертних систем для підтримки прийняття рішень в процесі сортування вживаної деревини / *Vykorystannya nechitkykh ekspertnykh system dlya pidtrymky pryynyattya rishen' v protsesi sortuvannya vzhivanoyi derevyiny* [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>

13. **Gayda S.V.** (2017). Комплексні дослідження зміни пружних властивостей вживаної деревини ялиці з віком / *Kompleksni doslidzhennya zminy pruzhnykh vlastyvostey vzhivanoyi derevyiny yalytsi z vikom* [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>

14. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). *Bulletin of KhNTUA* 197:3-9, (in Ukrainian).

15. **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).

16. **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).

17. **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>

18. **Gayda S.V.** (2024). Analysis of the trend of the main indicators of the wood processing industry in the context of the circular economy. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 4-15 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245001>

19. **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.

20. **Gayda S.V., Bilyy Ya.M.** (2016). The investigation of the shape stability of glued panels made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 42, 69-79. <https://doi.org/10.36930/42164211> (in Ukrainian).

21. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2013). Технология очистки вторично используемой древесины иглофрезерными станками [The technology of cleaning recycled wood with needle milling machines] // *Actual problems and prospects of the development of LPK: materials II NTK.*, September 9-11, 2013 – Kostroma. – P. 36-39. (in Russian).

22. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2018). Shape stability as a quality criterion for PCW-made blockboards. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 17, 185-192. <https://doi.org/10.15421/411834> (in Ukrainian)
23. **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. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212484>.
24. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2021). Властивості вживаної деревини як визначальний чинник якості меблевих виробів / *Vlastyvosti vzhynanoyi derevyny yak vyznachal'nyy chynnyk yakosti meblevykh vyrobiv* [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). <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., Kshyvetskyi B.Ya.** (1999). Техніко-економічні характеристики деревообробної фабрики майбутнього [Technical and economic characteristics of the woodworking factory of the future]. *Scientific Bulletin of UNFU* 9.3:83-85. (in Ukrainian).
27. **Gayda S.V.** (2013). Resource-saving technologies of recycling of post-consumer wood]. *Scientific Bulletin of NULES of Ukraine: Technology and Energy of agroindustrial complex* 185(2):271-280, (in Ukrainian).
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. <https://doi.org/10.36930/42234903>] (in Ukrainian).
29. **Gayda S.V., Maksymiv V.M.** From recycled post-consumer wood towards prime quality particleboard / Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть // міжвід. наук.-техн. зб. – Львів: НЛТУ України. – 2010, вип. 36. – С. 57-77.
30. **Gayda S.V., Medvid L.V.** (2024). Construction of the mathematical model of the strength of post-consumer wood made blockboard of different designs. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 27, 180-189. <https://doi.org/10.15421/412424> (in Ukrainian)
31. **Gayda S.V., Nikityuk L.O.** (1998). До питання застосування екстрагованої деревини для плитного виробництва [On the issue of using extracted wood for slab production]. *Scientific Bulletin of UNFU* 8:75-77. (in Ukrainian).
32. **Gayda S.V., Petryshak I.V.** (2020). Study of the influence of breed and grinding modes on the specific productivity of grinding skin. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 5-15. <https://doi.org/10.36930/42204601> (in Ukrainian).
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 (in Ukrainian).
34. **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>
35. **Lesiv, L.E.** (2020). Study of the characteristics of combined of blockboards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 48, 69-86. <https://doi.org/10.36930/42224806> (in Ukrainian).
36. **Lesiv, L.E., Gayda, S.V., Salapak, L.V.** (2024). Development of a mathematical model of the strength of joined preparations from post-consumer fir wood, [Лесів, Л.Е., Гайда, С.В., Салапак, Л.В. Розроблення математичної моделі міцності з'єднаних заготовок із вживаної деревини ялиці]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 16-28 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245002>
37. **Medvid, L.V.** (2018). Systematization of wood waste – the basis of their effective use. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 91-104. <https://doi.org/10.36930/42184412> (in Ukrainian).

38. **Medvid, L.V.** (2021). Post-consumer wood – an additional reserve of raw materials for construction materials. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 47, 34-46. <https://doi.org/10.36930/42214706> (in Ukrainian).
39. **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>
40. **Orikhovskyy R.Ya., Gayda S.V.** (2024). Determination of running time losses in automated processing systems of woodworking, [Оріховський Р.Я., Гайда С.В. Оцінювання ефективності використання робочого часу в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 41-51 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245004>
41. **Podibka T.I.** (2018). Constructions and technological aspects of furniture panels in regulatory documents. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 83-90. <https://doi.org/10.36930/42184411> (in Ukrainian).
42. **Podibka T.I.** (2020). A investigation of form of stability of variously designed furniture board made of pine wood of different constructions. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 108-120. <https://doi.org/10.36930/42204613> (in Ukrainian).
43. **Vintoniv I.S., Sopushynskyy I.M., Teishinger A.** (2007). *Derevynoznavstvo* [Wood-science]. – Lviv: Apriori. – 312 p., (in Ukrainian).
44. **Voytovych I.G.** (2010). *Osnovi tekhnologii virobiv z derevini* [The basic technology of wood]. – Textbook. –Lviv: Kraine andeljat. – 304 p. (in Ukrainian).

UDC 674.001

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

DETERMINATION OF THE DYNAMICS OF THE FORMATION OF WOOD RESIDUES AND WASTE FROM PRODUCTION ACTIVITIES AT LLC "FORTUNA-MEBLI"

A comparative analysis of the dynamics of the formation of residues and waste from the processing of wood and composite structural materials into blanks at the furniture enterprise LLC "Fortuna-mebli" for three years (2022-2024) was performed. The dynamics of the volume of accumulation of waste and residues from the processing of beech wood and structural materials: MDF boards, chip-board and plywood was analyzed in detail. It was established that during the three-year period, a stable decrease in the total amount of waste and residues at the enterprise was observed at this enterprise, which indicates successful measures to optimize production processes. The total amount of waste and residues at the enterprise showed a decrease from 54.80 m³ in 2022 to 30.48 m³ in 2024, which indicates an overall improvement in the efficiency of waste management and optimization of production processes during the analyzed period. It was found that the amount of solid residues - scraps decreased from 35.23 m³ in 2022 to 19.58 m³ in 2024. A slight decrease in 2023 (by ~3%) may be due to minor improvements in processing processes, while a significant decrease in 2024 (~43%) indicates a significant improvement in processing methods and material use. A decrease in sawdust and shavings was determined. Sawdust waste initially experienced a small increase from 11.92 m³ in 2022 to 12.58 m³ in 2023 (~6% increase), after which it decreased significantly to 6.65 m³ in 2024 (~47% decrease), which is the result of optimization of cutting processes. The amount of shavings waste decreased from 7.65 m³ in 2022 to 4.24 m³ in 2024. A decrease of ~38% from 2022 to 2023 and a further moderate decrease (~10%) from 2023 to 2024 indicate effective management of this type of waste and the possibility of its reuse. It is substantiated that reducing waste volumes contributes to reducing the costs of its disposal, improving the environmental image of the enterprise and increasing its competitiveness in the market.

Keywords: wood, used wood, wood residues, wood waste, construction materials, plywood, particleboard, MDF board, technology, recycling, disposal, circular economy.

ДО ВІДОМА АВТОРІВ СТАТЕЙ

Під час підготовки статей для міжвідомчого науково-технічного 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 : міжвід. наук.-техн. зб. —
Львів: НЛТУ України. — 2024, вип. 50. — 118 с.

Збірник науково-технічних праць

ЛІСОВЕ ГОСПОДАРСТВО,
ЛІСОВА, ПАПЕРОВА І ДЕРЕВООБРОБНА
ПРОМИСЛОВІСТЬ

Міжвідомчий
науково-технічний збірник

виходить з 1964 р.

ВИПУСК 50

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 29.06.24. Формат 60×84/16
Папір офсетний. Гарнітура Times. Друк офсетний
Умов. друк. арк. 6,86. Умов. фарб. відб. 7,09
Наклад 250 прим. Зам. № 783/2024

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
(Серія КВ, № 11890-761ПР від 26.10.2006 р.)

Згідно з переліком №19, «Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість» належить до нау-
кових 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