

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ОБСЯГІВ УТВОРЕННЯ ВЖИВАНОЇ ДЕРЕВИНИ

Обґрунтовано, що потенційним джерелом деревинної сировини є різні деревинні відходи, зокрема, вживана деревина (ВЖД). Зроблено детальний огляд та ґрунтовний аналіз для визначення принципів класифікації ВЖД на українському рівні. Запропоновано класифікацію ВЖД за ступенями забруднення на чотири групи. Розроблено методику розрахунку ВЖД, що дає змогу ефективно та достовірно розраховувати її кількість. Запропоновано математичну модель розрахунку потенціалу та балансу ВЖД за походженням. Встановлено, що середньозважений річний відсоток ВЖД від торгівельної мережі коливається в межах 14-16 %, будівництва – 20-24 %, сировинних та деревообробних галузей – 6-10 %, спожитих (старих) меблевих виробів – 10-16 %, муніципальних відходів – 16-18 %, ТПВ – 16-22 %, інших надходжень – 6-8 %. На основі статистичних даних з 2015 по 2023 року одержано апроксимуючі степеневі залежності за кожним сумарним показником, що дають можливість прогнозувати обсяги утворення ВЖД у найближчій перспективі, зокрема до 2024 р. Реалізація розробленої математичної моделі дає змогу здійснити ефективне прогнозування розподілу ВЖД за категоріями, які визначають ступінь забруднення та, відповідно, відсоток матеріального перероблення ВЖД. Розраховано, що потенціал ВЖД в Україні у 2023 р. становив близько 1,783 млн. т. Обґрунтовано, що удосконалення господарювання ВЖД на всіх рівнях повинно базуватись на загальних технічних, економічних і екологічних стандартах і зосереджуватись на наступних пропозиціях: аналіз управління ВЖД; розрахунок потенціалу ВЖД, як вторинного сировинного матеріалу і джерела енергії; удосконалення баз даних про технічну, економічну, екологічну і статистичну інформацію; впровадження нових підходів управління ВЖД з врахуванням вже існуючих схем. Розроблено стратегію матеріального використання ВЖД, яка базується на оцінюванні потенційних обсягів ВЖД за математичною моделлю, систематизації ВЖД за категоріями, класифікації за забрудненням, концепції утилізації ВЖД шляхом перероблення на розмірно-придатні заготовки та конструкційні матеріали, зокрема столярні плити різних конструкцій з прогнозованими характеристиками, що враховують фізико-механічні властивості цього деревинного ресурсу.

Ключові слова: вживана деревина, класифікація, перероблення, математична модель, деревинний ресурс, утилізація, стратегія, екологія, енергія.

Стан питання. Вживана деревина (ВЖД) – це матеріал, який раніше використовувався в будівництві, виробництві меблів, архітектурі або інших додатках і був згодом вилучений з первісного використання [1-3, 7, 9, 11-30]. Така деревина може мати унікальний вигляд та історію, яка додає їй цінності. Основні аспекти ВЖД включають:

- **Екологічні переваги:** Використання ВЖД допомагає знижувати потребу в нових деревинних ресурсах, тим самим сприяючи збереженню лісів та зменшенню викидів вуглекислого газу.

- **Характеристики:** ВЖД може мати різноманітні характеристики, залежно від свого попереднього використання та старіння. Вона може мати унікальну тек-

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

² 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>

стуру, кольорові відтінки або сліди зносу, що робить її особливо привабливою для дизайнерів та архітекторів.

- **Застосування:** ВЖД широко використовується у виробництві меблів, будівництві, архітектурі, створенні декоративних елементів та в художніх проектах. Вона також може бути використана як паливо або перероблена на інші продукти.

- **Виклики:** Одним з викликів є забезпечення якості та безпеки ВЖД, особливо якщо вона була попередньо оброблена хімічними речовинами або має пошкодження від шкідників чи гниття.

- **Тренди в дизайні:** В останні роки зростає попит на ВЖД у сфері дизайну, оскільки це відповідає тенденціям сталого розвитку та індивідуалізації просторів.

В цілому, ВЖД є цінним ресурсом, який може бути використаний у різних формах, додаючи унікальність та екологічну стійкість проектам та продукції.

Актуальність. Проблема накопичення та утилізації ВЖД особливо гострою стала на початку ХХІ століття, що зв'язано із розвитком обробних галузей. Це зазначено в наукових працях вчених різних країн. [9, 10, 12, 19, 31, 34]. Використання ВЖД є актуальним з кількох причин:

- **Екологічна стійкість:** Використання ВЖД допомагає знизити потребу у вирубці нових лісів, тим самим зменшуючи вплив на довкілля. Це сприяє збереженню лісових ресурсів і біорізноманіття.

- **Зменшення відходів:** Переробка ВЖД на нові продукти зменшує кількість відходів, що потрапляють на звалища. Це важливо для управління відходами та зниження впливу на навколишнє середовище.

- **Енергетичне використання:** ВЖД може використовуватися як джерело енергії, наприклад, у виготовленні деревних пелет або брикетів для опалення. Це альтернатива традиційним видам палива, що може сприяти зниженню залежності від викопного палива.

- **Економічна вигода:** Переробка та повторне використання ВЖД може бути економічно вигідною, оскільки знижує витрати на сировину і відкриває нові ринки для продуктів із переробленої деревини.

- **Підтримка сталого будівництва:** У будівельній галузі використання ВЖД сприяє сталому будівництву, зокрема через використання перероблених матеріалів у проектах.

Загалом, актуальність використання ВЖД впливає з її вкладу в екологічну стійкість, економічну ефективність, і зниження впливу на довкілля.

Проблеми застосування ВЖД. Використання ВЖД, хоча і має багато переваг, стикається з деякими проблемами [8, 14, 35]:

- **Якість матеріалу:** ВЖД може бути менш міцною або довговічною порівняно з новою. це особливо актуально для деревини, що була піддана атмосферним впливам або механічному пошкодженню.

- **Обмеження у переробці:** переробка ВЖД може бути складнішою через наявність цвяхів, скоб, клею, фарби або інших матеріалів, які ускладнюють обробку і можуть пошкодити обладнання.

- **Екологічні запитання:** хімічні речовини, які використовувались в оригінальних виробах з деревини (наприклад, консерванти, фарби), можуть бути шкідливими для навколишнього середовища та здоров'я людини під час переробки.

- **Транспорт та логістика:** збір та транспортування ВЖД може бути логістично складним і витратним, особливо якщо деревина знаходиться в розкиданих або важкодоступних місцях.

- **Ринкові обмеження:** існує обмежений попит на деякі види ВЖД, особливо якщо вона має унікальні або нестандартні розміри, форми або види.

- **Регуляторні виклики:** в деяких регіонах можуть існувати строгі регуляторні обмеження щодо переробки та повторного використання ВЖД, що може включати вимоги до якості, безпеки, або екологічних стандартів.

Ці проблеми вимагають уваги та інноваційних рішень, щоб повністю реалізувати потенціал ВЖД як сталого ресурсу. Тому, аналізуючи проблеми первинної сировини та проблема відходів, встановлено, що додатковим, незадіяним ресурсом та невикористаною базою деревинної сировини, запаси якої збільшуються одночасно з розвитком різних галузей та господарств, є запаси ВЖД (ВЖД).

Наукові праці про застосування ВЖД. Наукові праці, що висвітлюють застосування ВЖД, зосереджуються на різних аспектах цієї теми, включаючи перероблення, стале будівництво, дизайн та екологічний вплив [4-6, 22-40].

Одним із досліджень [4] є "Framework for sustainable building design and construction using off-cut wood" з журналу «Materials Sustainability». Ця робота представляє систему використання відходів деревообробки (off-cut wood) для сталого дизайну та будівництва. Дослідження описує процес створення бази даних для нерегулярної відновленої деревини, використовуючи технології 3D сканування та фотограметрії, і розробку структур на основі цієї деревини.

Інша наукова праця [5] "The case for urban and reclaimed wood in the circular economy" з «BioResources» розглядає міську та відновлену деревину в контексті циркулярної економіки. Дослідження фокусується на використанні дерева, яке було зрізане в міських районах або видалене в результаті будівництва та демонтажу, для створення продуктів з доданою вартістю. Це включає аналіз екологічного впливу використання відновленої деревини та її роль у секвестрації вуглецю. Ці та інші дослідження підкреслюють значення ВЖД у сталому розвитку, її потенціал для інноваційного дизайну та важливість в її інтеграції в циркулярні економічні моделі.

Вчені, що досліджують вживану деревину. В області дослідження ВЖД працюють багато вчених, які зосереджуються на різних аспектах цього питання, включаючи стале будівництво, переробку, дизайн, та використання в архітектурі. Наприклад, на сайті Cornell AAR представлено дослідження [6] під назвою "Structural Design Using Reclaimed Wood – A Case Study and Proposed Design Procedure", яке описує використання відновленої деревини у структурному дизайні. Це дослідження демонструє, як можна використовувати ВЖД у нових конструкціях, зменшуючи таким чином вплив будівельної індустрії на клімат.

Вчена Ratajczak E. [38-40] та інші польські науковці Oniśko W., Dobrowolska E., Matejak M. [37] описують можливі шляхи матеріального використання ВЖД, обговорюючи каскадну модель поводження із цією сировиною – поетапного оброблення ресурсу на придатні дерев'яні вироби, якщо не ефективно – тільки тоді здійснювати спалюванню. Дослідник Marutzky R. [34] описав методику перероблення ВЖД на деревинностружкові плити. Але вище наведені вчені не надали ін-

формації щодо ефективного використання ВЖД в цілісному вигляді, тобто розмірно-придатних загоговок з якісними показниками.

Науковці з різних установ, включаючи Virginia Polytechnic Institute, Forest Products Laboratory в Медісоні, University of Idaho, і Washington State University, активно працюють над дослідженнями у галузі використання ВЖД. Їх робота охоплює широкий спектр тем, включаючи розробку нових конструктивних елементів з деревини, вивчення менш відомих видів дерев, що можуть зменшити вирубку комерційно цінних порід, та розробку композитних матеріалів, що поєднують деревину з іншими матеріалами. Також проводяться дослідження щодо використання деревини з плантацій та переробки відходів деревини

Ці та інші наукові праці свідчать про зростаючий інтерес до використання ВЖД та її потенціалу у різних областях, включаючи архітектуру, дизайн та стале будівництво. Характеристикою ВЖД займалися багато вчених у різних країнах (табл. 1), зокрема: Гофман В. [31]; Маруцький Р. [34]; Дроссель К. [10]; Ногер Д. [36]; Онисько В., Матейк М., Добровольська Є. [37]; Ратайчак Є. [38-40]; Мантай У., Веймер Н., Кайпер Л., Лік Н. [33]; Брандстер М. [8], Бехта П. [7] та Гайда С.В. [11-30]. Вчені активно досліджують як методи переробки та використання ВЖД, так і її вплив на довкілля та сталий розвиток.

Проблеми класифікації ВЖД. Класифікація ВЖД необхідно здійснювати з врахуванням різних критеріїв, зокрема залежно від її походження, стану, потенційного використання та інших характеристик [7, 17, 18, 22, 27]. Ось деякі з основних категорій:

1. За походженням:

- **Міська деревина:** Деревина, отримана з міських дерев, зрубаних через будівництво, штормові пошкодження або хвороби.
- **Деревина з будівель та споруд:** Включає деревину, отриману з демонтажу старих будівель, сараїв, мостів тощо.
- **Промислові відходи:** Деревина, що залишається від виробничих процесів, таких як обрізки або відходи від обробки.

2. За станом:

- **Непошкоджена деревина:** Деревина, яка зберегла свої первинні якості і може бути використана без значних обробок.
- **Пошкоджена деревина:** Має видимі пошкодження, такі як тріщини, сколи, зміна кольору, або пошкодження від шкідників.

3. За видами обробки:

- **Оброблена деревина:** Раніше була покрита фарбами, лаками або іншими захисними речовинами.
- **Необроблена деревина:** Залишається в природному стані без додаткових обробок.

4. За потенційним використанням:

- **Деревина для меблів та декору:** Якісна деревина, яка може бути використана для виготовлення меблів або декоративних предметів.
- **Конструкційна деревина:** Підходить для будівельних цілей, включаючи рами, опори тощо.
- **Деревина для енергії:** Зазвичай низькоякісна або сильно пошкоджена деревина, яка може використовуватися для виробництва біопалива.

Кожна категорія вимагає специфічного підходу до переробки та повторного використання, щоб максимально ефективно використовувати потенціал ВЖД. У кожній із країн ЄС є своя класифікація ВЖД, але в основі пропонованих категорій визначальним є ступень забруднення (табл. 1).

Таблиця 1. Особливості класифікації ВЖД в ЄС

№	Країна	Категорії ВЖД				
1.	Європа	Altholzkategorie: AI, AII, AIII, AIV				PCB-A
2.	Німеччина	Klasse A I	Klasse A II	Klasse A III	Klasse A IV	PCB-A
3.	Австрія	Gruppe H1	Gruppe H2: H2.1; H2.2; H2.3		Gruppe H3	
4.	Люксембург	A I	A II	A III	A IV	PCB-b
5.	Швейцарія	Klasse A I	Klasse A II	Klasse A III	Klasse A IV	PCB-A
6.	Нідерланди	A-quality	B-quality		C-quality	
7.	Англія	Grade 1	Grade 2	Grade 3	Grade 4	
	Польща	Grupy I	Grupy II	Grupy III	Grupy IV	

На підставі детального аналізу великої кількості літературних джерел українських та закордонних науковців встановлено, що основним критерієм класифікації ВЖД є ступінь її забруднення. У термін «вживана деревина» закладено промислові відходи деревини (в т. ч. браковану продукцію) та спожиті (відпрацьовані) вироби з деревини, деревинних матеріалів або з композиційних матеріалів із вмістом деревини більше ніж 50 % маси.

Матеріали та характеристики забруднювачів ВЖД. На різних стадіях життєвого циклу (використання деревини) – від лісозаготівель та деревооброблення до кінцевого споживання готових виробів – утворюються різноманітні відходи – вживана деревина, яка може бути як в натуральному, так і в дуже забрудненому вигляді. Безумовно існує багато різновидів проміжного забруднення, яке виражається механічними та матеріальними включеннями і наявністю шкідливих та безпечних хімічних елементів та їх сполук як зовні, так і в середині ВЖД.

Класифікація включень ВЖД охоплює наступні різновиди:

- зовнішні: залізні і кольорові метали; пісок і пилюка; пластмаса і скло, папір і картон, текстиль і ганчірки, каміння і бетон, тефлон і фольга, ґрунт та ін.;
- поверхневі: а) личкувальні матеріали: декоративні плівки, ПВХ плівки, декоративно паперово-шаруваті пластики, штучні та натуральні шкіри, тканини, пластмаси та ін.; б) лакофарбові матеріали: плівкоутворюючі матеріали, фарби, лаки, емульсії, ґрунтівки, оліфи, відбілювальні матеріали та ін.;
- внутрішні: а) в'язучі речовини: смоли, клеї та ін.; б) просочувальні речовини – консерванти деревини - речовини захисту: антисептики, антипирени, інсектициди, фунгіциди, біоциди, гідрофобізатори, комплексні препарати та ін.

Результати досліджень. На підставі співставлення аналогічних груп відходів (ВЖД), які прийняті в країнах Європейського Союзу, пропонується впровадження для українського законодавства в сфері поводження відходами деревини і вживаними виробами з деревини чотири категорії відходів, які можуть мати матеріальне та енергетичне використання, та відходи ліквідації, які не входять ні в одну із категорій:

- Перша категорія – ВЖД I (ВЖД-I) – природна та тільки механічно оброблена деревина з незначними забрудненнями натуральними зв'язками (парафін, цере-

зин, петролатум, віск, гач, мастило та ін.), а також деревина від стихійних катаклізмів;

- Друга категорія – ВЖД II (ВЖД-II) – оброблена деревина та деревні матеріали без речовин захисту деревини та без галогеноорганічних зв'язків у покриттях;
- Третя категорія – ВЖД III (ВЖД-III) – оброблена деревина та деревні матеріали без речовин захисту деревини та з галогеноорганічними зв'язками у покриттях;
- Четверта категорія – ВЖД IV (ВЖД-IV) – деревина та деревні матеріали, які оброблені речовинами захисту;
- Відходи ліквідації – ВЖД ПХБ (ВЖД-ПХБ) – деревина та деревні матеріали, які містять поліхлоровані біфеніли (ПХБ), поліхлоровані терфеніли (ПХТ), полібромовані біфеніли (ПББ) концентрацією 50 мг/кг і більше, а також фракції кам'яновугільної смоли, які містять бенз(а)пірен та його сполуки більше норми.

Динаміка ліквідної деревини як основа для розрахунку ВЖД в Україні. Потенціал утворення ВЖД в Україні можна оцінити, виходячи з обсягів заготівлі та обліку деревини. За 2022 рік, наприклад, підприємствами Держлісагентства було заготовлено 15,349 млн. м³ ліквідної деревини, що на 16,5% менше, ніж у попередньому році (рис. 1). Це включало різні види деревини, такі як діловий круглий ліс, паливна деревина та інша деревина, що безперечно, повинно враховуватись під час визначення кількості ВЖД. Загальний потенціал лісової біомаси, яка обліковується та не обліковується, теоретично доступний для будь-якого перероблення, оцінюється від кількості заготовленої ліквідної деревини від 14,836 (мінімальний показник у 2023 р.) до 22,612 (максимальний показник у 2016 р.) млн. м³ на рік.



Рис. 1. Обсяги заготівлі ліквідної деревини в Україні

Такі дані свідчать про значні обсяги щорічної заготівлі первинної деревини, що за відповідного оброблення буде замінювати вироби із завершеним терміном експлуатації, з одного боку, та накопиченню ВЖД, як спожитої. Сюди також треба долучати відходи деревообробки, неліквідну деревина та лісосічні відходи.

Останні, за оцінками експертів, можуть складати додаткові 12-14% до загального потенціалу. А ці додаткові деревинні ресурси можуть бути використані не тільки в енергетичних цілях, але й для перероблення та повторного використання. Це створює можливості для ефективного використання резервів сировини, зокрема для матеріального перероблення.

Розрахунок потенційних обсягів утворення ВЖД. Кількісний баланс ВЖД за походженням розрахований за статистичними показниками Головного управління статистики України, які ведуться більше десяти років. Спожита деревина набирає статусу ВЖД, якщо вона накопичується на складі заготівлі і стає товарною продукцією (наприклад, в США, Англії під назвою «Post-consumer wood») [1-3]. Для розрахунку балансу було обліковано ВЖД за походженням, як це робиться в країнах ЄС: ВЖД від торгівлі – піддони, тара та ін., ВЖД від сектору будівництва – асортимент спожитих виробів з деревини, ВЖД від сировинних та обробних галузей – відходи та залишки виробництва, які не потрібні для внутрішнього використання, ВЖД від приватних господарств – старі меблі та інші вироби з деревини, ВЖД від господарської діяльності – муніципальні відходи; ВЖД від житлово-побутової та адміністративно-громадської діяльності – ТПВ, та ВЖД іншого надходження (техногенних і природних катастроф [11-15, 31]. Розвиток будь-якої країни зумовлений різностороннім виробництвом, зокрема переробленням деревини. З іншого боку, на території країни проживає населення, яке користується благами суспільства – деревинними ресурсами та виробами, а також утворює та накопичує різні види відходів, зокрема вживану деревину. Оскільки країна як об'єкт, в якому накопичується ВЖД та за аналогією є підприємством, яке виготовляє продукцію, то це дає можливість розробити математичну модель на основі виробничих функцій для визначення обсягів ВЖД.

Мета дослідження – побудова функції, яка б прогнозувала обсяги утворення ВЖД в країні. Розрахунок потенційних обсягів утворення ВЖД може базуватися на різних даних та оцінках. Наприклад, можна використовувати статистику щодо обсягів вирубки лісів, виробництва деревини, демонтажу будівель, а також ураховувати деревину, яка виходить з використання в результаті пошкоджень або старіння.

Тому важливими є наступні статистичні показники:

1. **Обсяги заготівлі лісу:** Це включає кількість деревини, яка вирізається щороку. Ця інформація часто доступна в державних або приватних лісництвах.
2. **Виробництво дерев'яних виробів:** Це включає дані про кількість деревини, яка використовується в промисловості для виробництва різних виробів.
3. **Демонтаж будівель:** Це охоплює кількість деревини, яка виходить з використання в результаті демонтажу старих будівель і споруд.
4. **Деревина, що виходить з використання:** Включає деревину, яка стає непридатною для використання через пошкодження, хвороби дерев, природні катастрофи тощо.

Нами був проведений системний аналіз процесу потенційного утворення ВЖД в країні дав можливість виявити залежність від основних факторів (показників).

Серед безлічі факторів, які впливають на утворення ВЖД, є:

- Обсяг заготівлі ліквідної деревини, млн. м³, (ВЖД в цілому)

- Чисельність населення, млн. осіб, (ВЖД_{ТПВ})
- Обсяг житлового фонду, тис. м², (ВЖД_{Будівництво})
- Обсяг виробництва обробних галузей, млн. грн, (ВЖД_{Залишки, брак})
- Обсяг обороту роздрібної торгівлі, млн. грн, (ВЖД_{Тара})
- Обсяг грошових доходів населення, млн. грн, (ВЖД_{Меблі})
- Обсяг деревинних ресурсів міст, млн. м³, (ВЖД_{Муниц})
- Обсяг ВЖД від природних катастроф та явищ, млн. м³, (ВЖД_{інша})

За час багаторічного дослідження нами встановлено, що середньозважений річний відсоток ВЖД від торгівельної мережі (V_T) коливається в межах 14-16 %, будівництва (V_B) – 20-24 %, сировинних та деревообробних галузей (V_D) – 6-10 %, спожитих (старих) меблевих виробів (V_M) – 10-16 %, МВ (V_{MB}) – 16-18 %, ТПВ ($V_{ТПВ}$) – 16-22 %, інших надходжень (V_{IH}) – 6-8 %.

Загальна формула розрахунку ВЖД за походженням має вигляд:

$$V_{ВЖД} = V_T + V_B + V_D + V_M + V_{MB} + V_{ТПВ} + V_{IH} \quad (1)$$

На основі статистичних даних з 2015 по 2023 рік було одержано апроксимуючі степеневі залежності за кожним сумарним показником, що дають можливість прогнозувати обсяги утворення ВЖД у найближчій перспективі, зокрема до 2024 року (рис. 2, рис. 3).

Щоб зменшити величини коефіцієнтів у формулах, роки розрахунків N закодовано, зокрема за нуль прийнято 2019 рік, а $\pm 1 \dots \pm 5$ це відповідні роки.

Загальна математична модель за всіма складовими має вигляд:

$$V_{ВЖД(N)} = 0,26N_T^{0,10} + 0,38N_B^{0,11} + 0,19N_D^{-0,16} + 0,17N_M^{0,31} + 0,33N_{MB}^{0,034} + 0,41N_{ТПВ}^{-0,06} + 0,15N_{IH}^{-0,013} \quad (2)$$

Величини коефіцієнтів у загальній формулі свідчать, що на обсяги утворення ВЖД суттєво впливають сектор будівництва, муніципальні відходи та ТПВ. Мінусові степеневі показники засвідчують зменшення кількості утворень ВЖД, зокрема, у доданках ТПВ, що зумовлено зменшенням населення України, наявністю обробних галузей, де налагодили перероблення відходів, залишків виробництва та бракованої продукції. Найбільший додатний степеневий показник 0,31 у спожитих меблях, що говорить про зростання добробуту населення та стійкий ріст грошових доходів населення. Найближчим часом така тенденція буде зберігатися.

Узагальнена модель прогнозування обсягів утворення ВЖД має вигляд:

$$V_{ВЖД(N)} = 1,88N^{0,058} \quad (3)$$

Крім того, якщо від загальної моделі прогнозування обсягів утворення ВЖД відділити обсяги утворення $V_{ТПВ}$ та інший доданок прив'язати до щорічної кількості ліквідної деревини V_3 , то одержимо математичному модель в такому вигляді:

$$V_{ВЖД(N)} = 1,47N_3^{0,085} + 0,41N_{ТПВ}^{-0,06} \quad (4)$$

А загальна формула для розрахунку обсягу ВЖД ($V_{ВЖД}$) в Україні набере вигляду:

$$V_{ВЖД} = 0,13 V_3 + 0,03 V_{ТПВ} \quad (5)$$

Запропонована методика та математична модель дають можливість оперативно прогнозувати обсяги утворення ВЖД, шляхи перероблення та оперативно реагувати на соціально-економічні зміни для забезпечення екології, що дозволить суттєво зменшити техногенне навантаження на довкілля.

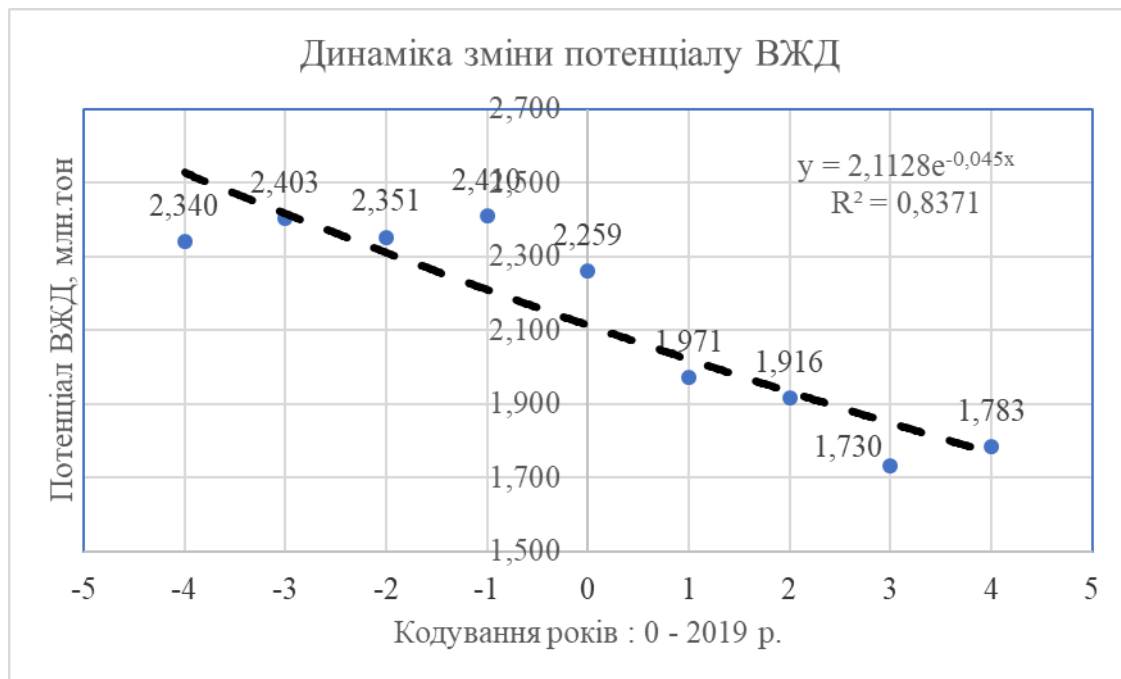


Рис. 2. Степенева залежність потенційних обсягів утворення ВЖД



Рис. 3. Потенційні обсяги утворення ВЖД

Розроблення шляхів використання ВЖД. ВЖД може бути використана в багатьох напрямках, забезпечуючи екологічно стійкі та інноваційні рішення в різних сферах:

1. **Перероблення на меблеві вироби та декор:** ВЖД може бути використана для створення унікальних меблів та предметів інтер'єру. Це можуть бути столи, стільці, полиці або декоративні предмети, що додають особливого шарму будь-якому простору.

2. Створення конструкційних плитних матеріалів, зокрема меблевих щитів, столярних плит, деревностружкових плит для виготовлення корпусних меблевих виробів.

3. Для художників та ремісників ВЖД як ресурс для створення скульптур, інсталяцій або інших творчих проектів.

4. ВЖД може бути застосована в будівельних проектах, включаючи опори, балки, підлогу та інші елементи конструкції. Вона також використовується в архітектурі для створення унікальних і стильних будівель.

5. Низькоякісна або сильно пошкоджена деревина може бути використана як джерело біоенергії. Це включає виробництво пелет, брикетів або безпосереднє спалювання для отримання тепла.

6. ВЖД може бути використана для створення ландшафтних елементів, таких як декоративні огорожі, лави, альтанки або шляхові доріжки в садах.

7. Для реставрації старовинних будівель ВЖД може бути важливим ресурсом, особливо коли потрібно зберегти аутентичність матеріалів.

Ці шляхи використання ВЖД не тільки сприяють збереженню природних ресурсів та зменшенню відходів, але й відкривають нові можливості для сталого дизайну та креативності.

Майбутнє матеріальне застосування ВЖД виглядає обнадійливо, оскільки поєднує в собі екологічну стійкість та інноваційні технології. Ось деякі напрямки, які можуть бути ключовими в майбутньому:

1. **Стале будівництво:** Використання ВЖД в будівельній галузі може значно розширитися, особливо у створенні еко-будинків та сталої архітектури. Це може включати як структурні елементи, так і оздоблювальні матеріали.

2. **Технологічні інновації:** Розвиток нових технологій, таких як 3D-друк із деревини, може відкрити нові можливості для використання ВЖД у виробництві меблів, декоративних елементів та навіть будівельних компонентів.

3. **Енергетика:** Перетворення ВЖД на біопаливо, таке як пелети та брикети, може набути більшого значення в контексті зростаючого попиту на відновлювані джерела енергії.

4. **Відновлення історичних будівель:** Майбутнє використання ВЖД в реставрації старовинних будівель та монументів може зберегти історичну цінність при одночасному зменшенні впливу на довкілля.

5. **Упаковка та дизайн:** ВЖД може знайти застосування в екологічній упаковці та в дизайні продукції, де сталість та унікальність є ключовими факторами.

6. **Художні та ремісничі проекти:** ВЖД може стати популярним матеріалом для художників і ремісників, які прагнуть створити унікальні, екологічно чисті твори.

В цілому, використання ВЖД у майбутньому буде йти рука об руку з глобальними тенденціями сталого розвитку, циркулярної економіки та екологічної свідомості.

Сьогодні стан ефективного використання деревини в Україні в 2023 році характеризується кількома ключовими аспектами:

- **Ринкове регулювання:** Україна впровадила систему, де продаж деревини регулюється через ринкові механізми, включаючи аукціони. Це забезпечує більш прозорий і ефективний розподіл ресурсів, мінімізуючи корупцію та сприяючи чесній конкуренції серед покупців деревини.

- **Експорт деревини та інвестиції:** В останні роки Україна зазнала зростання в експорті деревини, що сприяло інвестиціям у деревообробну промисловість. Мораторій на експорт лісу-кругляку також відіграв важливу роль у привабленні іноземних інвестицій у цю галузь.

- **Стале використання деревини:** Україна зосереджена на сталому використанні деревини, особливо у будівництві. Ініціативи та вебінари, організовані у співпраці з організаціями, такими як Forest Stewardship Council (FSC), вказують на зростаючу увагу до екологічної відповідальності у використанні деревини.

- **Енергетичне використання деревини:** Україна також активно використовує відходи деревини для виробництва енергії. Використання деревної біомаси для виробництва тепла та електрики включає виготовлення брикетів і паливних гранул з відходів деревини, а також процеси когенерації для отримання електричної та теплової енергії.

Ці ініціативи вказують на зміцнення ролі України як важливого гравця на ринку деревини, а також її зобов'язання щодо сталого використання та ефективного управління лісовими ресурсами.

Висновки

1. З'ясовано, що глобальні темпи економічного зростання та споживання деревини та деревинних матеріалів у Європі та в Україні зумовлюють пошук додаткових ресурсів сировини. Проаналізовано, що в Україні сьогодні існує проблема сировинних ресурсів – комплексного використання деревини. Обґрунтовано, що потенційним джерелом деревинної сировини є різні деревинні відходи, зокрема, вживана деревина. Зроблено детальний огляд та ґрунтовний аналіз для визначення принципів класифікації ВЖД на українському рівні. Запропоновано класифікацію ВЖД за ступенями забруднення на чотири групи.

2. Розроблено методику розрахунку ВЖД, що дає змогу ефективно та достовірно розраховувати її кількість. Запропоновано математичну модель розрахунку потенціалу та балансу ВЖД за походженням. Встановлено, що середньозважений річний відсоток ВЖД від торгівельної мережі (V_T) коливається в межах 14-16 %, будівництва (V_B) – 20-24 %, сировинних та деревообробних галузей (V_D) – 6-10 %, спожитих (старих) меблевих виробів (V_M) – 10-16 %, МВ (V_{MB}) – 16-18 %, ТПВ ($V_{ТПВ}$) – 16-22 %, інших надходжень (V_{IH}) – 6-8 %. На основі статистичних даних з 2015 по 2023 року одержано апроксимуючі степеневі залежності за кожним сумарним показником, що дають можливість прогнозувати обсяги утворення ВЖД у найближчій перспективі, зокрема до 2024 року. Реалізація розробленої математичної моделі дає змогу здійснити ефективне прогнозування розподілу ВЖД за категоріями, які визначають ступінь забруднення та, відповідно, відсоток матеріального перероблення ВЖД. Статистика свідчить, що баланс ВЖД за категоріями складається з ВЖД-I / ВЖД-II, а також ВЖД-III / ВЖД-IV відповідно наполовину кожен, тобто 50/50. Категорії ВЖД-II і ВЖД-III відповідно мають частку приблизно одну третину кожна від загального обсягу.

3. Розраховано, що потенціал ВЖД в Україні у 2023 р. становив близько 1,783 млн. т. Потенційна кількість ВЖД на кожного мешканця України з 30 млн. чол. (01.01.2023) становить 59,4 кг. На підставі системного підходу та моніторингу розраховано потенційний обсяг утворення ВЖД за областями України, зокрема у Львівській області він склав 110 тис. тон.

4. Встановлено, що в Україні сьогодні немає конкретних заходів державного регулювання, які використовуються в індустріально розвинутих країнах для активізації роботи в галузі ресурсозбереження та переробленню ВЖД. Обґрунтовано, що удосконалення господарювання ВЖД на всіх рівнях повинно базуватись на

загальних технічних, економічних і екологічних стандартах і зосереджуватись на наступних пропозиціях: аналіз управління ВЖД; розрахунок потенціалу ВЖД, як вторинного сировинного матеріалу і джерела енергії; удосконалення баз даних про технічну, економічну, екологічну і статистичну інформацію; впровадження нових підходів управління ВЖД з врахуванням вже існуючих схем. Встановлено, що важливим аспектом ефективного використання деревинних відходів є формування оптимальної системи їх раціонального кругообігу. Обґрунтовано основні стратегічні шляхи використання ВЖД, які лягли в основу розробленої концепції за такими напрямками: матеріальне та енергетичне використання, перетворення та складування.

5. Запропоновано використовувати у технологічних процесах деревообробки на підставі системного аналізу очищену ВЖД в масивному вигляді – для виробництва заготовок, столярної плити та меблевого щита; в подрібненому – для стружкових плит та паливних гранул і брикетів. Зокрема, для виробництва звичайних столярних плит пропонується використовувати рейки ВЖД трьох перших категорій, а для комбінованих столярних плит також рейки деревинних композиційних матеріалів.

6. Розроблено стратегію матеріального використання ВЖД, яка базується на оцінюванні потенційних обсягів ВЖД за математичною моделлю, систематизації ВЖД за категоріями, класифікації за забрудненням, концепції утилізації ВЖД шляхом перероблення на розмірно-придатні заготовки та конструкційні матеріали, зокрема столярні плити різних конструкцій з прогнозованими характеристиками, що враховують фізико-механічні властивості цього додаткового деревинного ресурсу.

References

1. „Verordnung über Anforderungen an die Entsorgung von Altholz“, 15. August 2002. BGBl. I, Nr. 59 vom 23.8.2002. - S. 3302.
2. „Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von AltholzV (Altholzverordnung)“, Art. 1a der Verordnung vom 1. März 2003. BGBl. I. - S. 3302-3317.
3. „Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz V (Altholzverordnung)“, Art. 2a der Verordnung vom 20. Oktober 2006. BGBl. I Nr. 48, - S. 2298, 2331.
4. Yu, B., Luo, J., Shi, Y. et al. (2023). Framework for sustainable building design and construction using off-cut wood. npj Mater. Sustain. 1, 2 <https://doi.org/10.1038/s44296-023-00002-8>
5. Pitti, A. R., Espinoza, O., and Smith, R. (2020). "The case for urban and reclaimed wood in the circular economy," BioRes. 15(3), 5226-5245.
6. Bergsagel, D., Heisel, F. (2023). Structural design using reclaimed wood – A case study and proposed design procedure. Journal of Cleaner Production, Volume 420, 25 September 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138316>
7. Bekhta P.A. (1999): Можливості повторного використання вживаної сировини: сучасний стан та перспективи / *Mozhlyvosti povtornoho vykorystannya vzhlyvanoyi syrovyny: suchasnyy stan ta perspektyvy* [Possibilities of reuse of used raw materials: current state and prospects] // Scientific Bulletin UNFU 9(5):34-44.
8. Brandstätter M. (1994): Rest-und Altholz; Anfall und Verwertung in osterreich. Holzforschung und Holzverwertung, 3:46-48.
9. COST Action E 31 (Hrsg.). (2004): National summary reports on the European market of recovered wood, 335.

10. **Drossel K., Wittke B.** (1996): Stoffliche Verwertung von Altholz- Rücknahme von Spanplatten und Altmöbeln für die Spanplattenherstellung, VDI-Verlag.
11. **Gayda S.V.** (2016): A investigation of form of stability of variously designed blockboards made of post-consumer wood // *ProLigno : Scientific Journal*. – Editura Universitatii «TRANSILVANIA» din Brasov. 12(1):22-31.
12. **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).
13. **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 ВЖД]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 42: 33-50. doi: <https://doi.org/10.36930/42164206>
14. **Gayda S.V., Somar G.V., Sokolovsky I.A.** (2022). Хімічна природа забруднювачів як основа класифікації виробів з деревини, що підлягають утилізації / *Khimichna pryroda zabrudnyuvachiv yak osnova klasyfikatsiyi vyrobiv z derevyny, shcho pidlyahayut' utylizatsiyi* [The chemical nature of pollutants as a basis for the classification of wood products to be utilization] . *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 48:14-27 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214802>
15. **Gayda S.V.** (2017): Комплексні дослідження зміни пружних властивостей ВЖД ялиці з віком / *Kompleksni doslidzhennya zminy pruzhnykh vlastyvostey vzhlyvanoyi 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>
16. **Gayda S.V.** (2018): Дослідження та аналіз характеристик щитових конструкцій із ВЖД / *Doslidzhennya ta analiz kharakterystyk shchytovykh konstruktсий iz vzhlyvanoyi derevyny* [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., Kiyko O.A.** (2018): Формостійкість як критерій якості столярних плит із ВЖД / *Formostiyst' yak kryteriy yakosti stolyarnykh plyt iz vzhlyvanoyi derevyny* [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).
18. **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 vzhlyvanoyi 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>
19. **Gayda S.V.** (2018): *Mitsnist kombinovanykh stolyarnykh plyt iz vzhlyvanoyi derevyny* [Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW)]. *Bulletin of KhNTUA* 197:3-9, (in Ukrainian).
20. **Gayda S.V., Salapak L.V., Lesiv L.E.** (2021). *Vyznachennya efektyvnoho tekhnolohichnoho protsesu vyhotovlennya riznykh opornykh elementiv dlya funktsional'nykh ploshchyn*. [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>
21. **Gayda S.V., Ya.M. Bilyy** (2016): Дослідження формостійкості клеєних щитів із ВЖД / *Doslidzhennya formostiystosti kleyenykh shchytiv iz vzhlyvanoyi derevyny* [The investigation of the shape stability of glued panels made of post-consumer wood]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 42: 69-79 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42164211>
22. **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).

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. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212484>
24. **Gayda, S., Kiyko, O.** (2020): The investigation of properties of blockboards made of post-consumer wood. *Drewno. Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty = Wood. Research Papers, Reports, Announcements*, 63(206), 77-102. <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.352.10>
25. **Gayda, S., Kiyko, O.** (2023): Study of Physical and Mechanical Properties of Post-Consumer Wood of Different Age. *Drewno. Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty = Wood. Research Papers, Reports, Announcements*, 66(212), doi: <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*, 64 (3):131–142, doi: <https://doi.org/10.2478/ffp-2022-0011>
27. **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].
28. **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. doi: <https://doi.org/10.36930/42154106>
29. **Gayda S.V.** (2013): Технології та рекомендації до використання вживаної деревини в деревообробленні / *Tekhnologii ta rekomendatsii do vikoristannya vzhivanoi dereviny v derevoobrobleni* [Technologies and recommendations on the utilization of post-consumer wood in woodworking industry]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 39(1):48-67 (in Ukrainian).
30. **Gayda S.V.** (2013): Технології та рекомендації до використання вживаної деревини в деревообробленні / *Resursooshchadni tekhnologii pereroblennya vzhivanoi dereviny* [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).
31. **Hoffmann V.** (1996): Zuordnungskriterien für Rest- und Altholz zur energetischen Verwertung oder thermischen Behandlung. In: R. Marutzky und W. Schmidt (Hrsg.): *Alt- und Restholz: Energetische und stoffliche Verwertung, Beseitigung, Verfahrenstechnik, Logistik*, VDI-Verlag, Düsseldorf. 185-189.
32. **Lesiv L.E.** (2022) Дослідження характеристик комбінованих столярних плит із ВЖД / *Doslidzhennya kharakterystyk kombinovanykh stolyarnykh plyt iz vzhivanoi derevyny* [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>
33. **Mantau, U., H. Weimar, L. Kuiper, and N. Leek.** (2005): Final report (part1): Origin and Commercialization Structure of Post-Consumer Wood in Germany and the Netherlands. University of Hamburg and Probos Wageningen. 31.
34. **Marutzky R.** (1997): Qualitätsanforderungen und Entsorgungswege für Rest-und Gebrauchtholzer. In: *Alt- und Restholz - Energetische und stoffliche Verwertung, Beseitigung, Verfahrenstechnik, Logistik*, VDI-Verlag, Düsseldorf. 114-118.
35. **Moxn J.** (2000): Emissionen und Stoffflüsse von (Rest-) Holzfeuerungen / Das Projekt wurde von den folgenden Institutionen finanziert: BUWAL Schweiz. Vereinigung für Holzenergie IG-Altholz Kantone (AG, BE, BS/BL, GE, TG, ZG, ZH) Anlagenbetreiber. - EMPA. Abteilung Luft-fremdstoffe / Umwelttechnik Bericht Nr. 880'002/1, 180.
36. **Noger D., et al.** (1996): Verwertung und Beseitigung von Holzaschen. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). Schriftenreihe Umwelt Nr. 269.
37. **Onisko W., Dobrowolska E., Matejak M.**: Opracowanie założeń klasyfikacji drewna użytkowego według kierunków jego zużycia. Opracowanie OBRPPD nr 74.1379.3.98.
38. **Ratajczak E., Szostak A., Bidzińska G.** (2003): *Drewno użytkowe w Polsce*, Instytut Technologii Drewna, 168.
39. **Ratajczak E., Szostak A., Bidzińska G., Leszczyszyn E.** (2018): Market in wood by-products in Poland and their flows in the wood sector. *Poznan : Drewno* 61(202): 5-20.
40. **Ratajczak E.** (2013): *Sektor leśno-drzewny w zielonej gospodarce*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Drewna, Poznań: 62-69.

Mathematical model of forecasting volumes of post-consumer wood production

It is substantiated that a potential source of wood raw materials is various wood waste, in particular, post-consumer wood (PCW). A detailed review and thorough analysis was made to determine the principles of PCW classification at the Ukrainian level. The classification of PCW by degree of pollution into four groups is proposed. A method of calculating the used wood has been developed, which makes it possible to calculate its quantity effectively and reliably. A mathematical model for calculating the potential and balance of PCW by origin is proposed. It was established that the weighted average annual percentage of PCW from the trade network ranges from 14-16%, construction - 20-24%, raw materials and woodworking industries - 6-10%, used (old) furniture products - 10-16%, municipal waste - 16-18%, solid waste – 16-22%, other revenues – 6-8%. On the basis of statistical data from 2015 to 2023, approximating power dependences for each total indicator were obtained, which make it possible to forecast the volume of PCW formation in the near future, in particular until 2024. The implementation of the developed mathematical model makes it possible to effectively forecast the distribution of PCW by categories that determine the degree of pollution and, accordingly, the percentage of material processing of PCW. It is estimated that the potential of PCW in Ukraine in 2023 was about 1.783 million tons. It is justified that the improvement of PCW management at all levels should be based on general technical, economic and environmental standards and focus on the following proposals: analysis of PCW management; calculation of the potential of PCW as a secondary raw material and energy source; improvement of databases on technical, economic, environmental and statistical information; implementation of new approaches to PCW management, taking into account already existing schemes. A strategy for the material use of PCW was developed, which is based on the assessment of potential volumes of PCW according to a mathematical model, systematization of PCW by categories, classification by pollution, the concept of utilization of PCW by processing into dimensionally suitable blanks and construction materials, in particular, carpentry plates of various structures with predicted characteristics, which take into account the physical and mechanical properties of this additional wood resource.

Keywords: post-consumer wood, classification, processing, mathematical model, wood resource, utilization, strategy, ecology, energy.
