

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет лісового господарства та екології
Кафедра експлуатації лісових ресурсів та деревообробних технологій

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

КОТЮК ВОЛОДИМИР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 684.4.04

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕРЕВИНИ
ШВИДКОРОСЛИХ ПОРІД НА ПРИКЛАДІ ПАВЛОВНІЇ

205 «Лісове господарство»

Подається на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
кваліфікаційна робота містить результати власних наукових досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело

_____ В.В. Котюк

Керівник роботи
Кульман Сергій Миколайович
кандидат техн. наук, доцент

Житомир – 2021

Висновок кафедри експлуатації лісових ресурсів

за результатами попереднього захисту: _____

Протокол засідання кафедри експлуатації лісових ресурсів та деревообробних технологій № ____ від « ____ » _____ 2021 р.

Завідувач кафедри експлуатації лісових ресурсів та деревообробних технологій

д. б. н., доцент _____ Кратюк Олександр Леонідович

« ____ » _____ 2021 р.

Результати захисту кваліфікаційної роботи

Здобувач вищої освіти Котюк Володимир Володимирович захистив кваліфікаційну роботу з оцінкою:

сума балів за 100-бальною шкалою _____

за шкалою ECTS _____

за національною шкалою _____

Секретар ЕК

_____ Білецька Наталія Миколаївна

АНОТАЦІЯ

Котюк В.В. Дослідження фізико-механічних властивостей деревини швидкорослих порід на прикладі павловнії.— Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 205 – лісове господарство. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

У цьому дослідженні деякі моделі росту, а також механічні та теплофізичні властивості деревини павловнії енерджі (*Paulownia energy*), отриманої з регіону Полісся (Луцьк), були досліджені.

Механічні та теплофізичні характеристики склали такі значення: швидкість радіального зростання після п'ятого року від 10 до 25 мм на рік; щільність – 346 кг/м³; межа міцності при згині – 59,71 МПа; модуль пружності при згині – 5157,23; міцність на стискування вздовж волокон – 39,9 МПа; міцність на стискування поперек волокон – 21,15 МПа; ударна згинальна міцність, 1,59 (Дж/см²); теплопровідність – 0,0617 Вт/м·К.

За отриманими результатами можна констатувати, що деревина павловнії енерджі може бути використана для виробництва деяких деталей меблів, пакувальної тари, в строительстве, в деревообробке, вагонка для бани, половая доска, обшивка стен для тепло и звукоизоляции.

Ключові слова: павловнія енерджі, механічні властивості, теплофізичні властивості

ANNOTATION

Kotyuk V.V. Research of physical and mechanical properties of wood of fast-growing breeds on an example of paulownia. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for a master's degree in the specialty 205 – forestry. –

Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

In this study, some growth models, as well as mechanical and thermophysical properties of Paulownia energy wood, obtained from the Polissya region (Luts'k), were studied.

Mechanical and thermophysical characteristics were as follows: radial growth rate after the fifth year from 10 to 25 mm per year; density - 346 kg / m³; flexural strength - 59.71 MPa; flexural modulus - 5157.23; compressive strength along the fibers - 39.9 MPa; compressive strength across the fibers - 21.15 MPa; impact bending strength, 1.59 (J/ cm²); thermal conductivity - 0.0617 W / m · K.

According to the results, it can be stated that Paulownia energy wood can be used for the production of some parts of furniture, packaging, construction, woodworking, bath lining, floor board, wall cladding for heat and sound insulation.

Key words: paulownia energy, mechanical properties, thermophysical properties

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	6
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ	9
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ	12
3.1. Річний приріст	12
3.2. Щільність (густина)	14
3.3. Усадка-набухання	15
3.4. Твердість поверхні	15
3.5. Прочність	16
3.6. Теплофізичні властивості	18
РОЗДІЛ 4. РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПРОМИСЛОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ	
4.1. Переваги гібриду paulownia energy при виготовленні дерев'яних євро вікон	20
4.2. Дослідження міцності складальних з'єднань вузлів меблів з гібрида paulownia energy	24
4.3. Дослідження можливості виробництва меблевого щита з деревини гібрида paulownia energy	27
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ	28
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	29

ВСТУП

У світі зростає тенденція до вирощування швидкозростаючих видів (сівозміна від 5 до 10 років). Їхня основна мета - виробництво деревних волокон і біомаси, але вони, безумовно, становлять потенціал у виробництві виробів з масиву деревини. Одним із швидкозростаючих видів є *Paulownia energy*. Плантаційне розведення *Paulownia sp.* в Україні невпинно зростає. Однак поки що немає достатньої інформації про технічні властивості деревини павловнії і тому в її кінцевому використанні виникають сумніви. У цій роботі представлені попередні результати дослідження деяких фізичних властивостей деревини гібриду в половинні енерджі, посаджених в районі м. Луцька Україна.

Метою даного дослідження було вивчення фізичних властивостей деревини гібриду павловнії енерджі, що виросла в регіоні українського полісся, та визначити відмінності у фізичних властивостях деревини інших популярних гібридів павловнії, а також оцінити співвідношення між щільністю та міцністю.

При вирішенні поставленого завдання використовувалися наступні методики дослідження: обчислювальний експеримент у середовищі SolidWorks Simulation методом кінцевих елементів (МКЕ); метод визначення межі міцності при випробуванні деревини на вигин.

Об'єкт дослідження – деревина восьмирічного віку половинії енерджі.

Предмет дослідження – механічні та теплофізичні властивості даної породи.

Публікації по темі досліджень:

1. С.Н. Кульман, В.В. Котюк Исследование теплопроводности древесины гибрида paulownia energy. Четверта Міжнародна науково-практична конференція “Екологічні проблеми навколишнього середовища та раціонального природокористування в контексті сталого розвитку” : збірник матеріалів (21–22 жовтня 2021, м. Херсон, Україна). – Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2021. – 476 с.

2. Котюк В.В., Бойко Л.М., Зимарова А.А. Застосування методів дендрохронології при розслідуванні незаконної рубки лісових насаджень. Ліс, наука, молодь: матеріали ІХ Всеукр. наук.-практ. конф. (24 листопада 2021 р.). – Житомир: Поліський національний університет, 2021. – 257 с.

3. Кульман С.М., Котюк В.В., Хилевич Р. Нелінійна динамічна модель зростання дерев на прикладі швидко зростаючої породи paulownia energy. Сучасні проблеми лісового господарства та екології: шляхи вирішення (Факультету лісового господарства та екології – 20 років) Матеріали міжнародної науково-практичної конференції (7-8 жовтня 2021 року, м. Житомир). – Житомир: Поліський національний університет, 2021 – 276 с.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень дозволили отримати статистично значущі величини міцнісних властивостей павловнії енерджі, порівняти фізичні властивості павловнії енерджі з іншими породами та виробити рекомендації щодо її промислового використання.

Структура та обсяг роботи. Робота містить 29 сторінок основного тексту, 15 малюнків, 7 таблиці, 47 найменувань літератури.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

В Азії та в деяких європейських країнах різні види павловнії кращі при вирощуванні дерев. Їх вирощують також у вигляді агролісомеліоративних плантацій промислового призначення. Причому ці плантації зазвичай створюються у поєднанні технічна деревина – сільськогосподарські культури, і рідко у змішаних культурах іншого призначення (наприклад, енергетика).

Наприклад, у китайському сільському господарстві павловнія культивується як проміжна рослина майже на 1,3 млн. га. Причина цього в тому, що Китай має убогі харчові ресурси, тому виробництво продуктів харчування та вирощування ділової деревини можуть здійснюватися на одному і тому ж [25].

Літературні дані та результати проведених в Україні досліджень свідчать про те, що види павловнії в основному невибагливі, мають високу врожайність і можуть бути вирощені відносно просто. Вони добре відтворюються із зернового або кореневого черешка (за деякими даними також з обрізки втечі). За сприятливих умов діаметра стовбура може досягати 30-40 см, висоти 10-12 м та врожайність деревини 0,2–0,6 м³ до 10-річного віку. При ідеальному вирощуванні умови його зростання може бути ще швидшим. [24].

Широкий спектр застосування павловнії варіюється від промислового застосування (меблі та будівництво, ділова деревина, основний матеріал для паперової промисловості, біомаса для цілей енергетики тощо) до бджільництва та медичної промисловості (кора, лист, квіткові кластери), а також для функції прикраси (паркове дерево, основний матеріал вишуканого різьблення по дереву). Завдяки хорошій оброблюваності та своєрідній декоративній текстурі, використовується в Японії як традиційна деревина, де високоякісна колода вважається цінним основним матеріалом. Менш цінний базовий матеріал можна використовувати на інших ділянках, наприклад для виробництва ДСП [15]. Деревина павловнії застосовується і як тепло- та електроізоляційний матеріал [1]. Щільність деревини найважливіша з погляду можливості її

використання. З інформації по щільності деревини можна зробити висновок про її властивості міцності [17]. Зазвичай існує сильна кореляція між щільністю та межею міцності (MOR) та модулем пружності (MOE) [27]. Базова щільність тісно пов'язана з параметрами якості кінцевого використання, такими як, наприклад, вихід целюлози та міцність конструкцій з даного матеріалу [14]. Деревні породи з більш високою щільністю зазвичай мають більш щільну деревину порівняно з породами нижчої щільності [26].

Павловнія в основному вирощується в регіонах з більш жаркими кліматичними умовами світу (переважно на великих плантаціях Китаю та США), де поширене використання *Paulownia elongata*. З цієї причини інформації про цю породу дерев досить багато, в той час як про породи, які переносять більш помірні кліматичні умови, таких як павловнія енерджі (*Paulownia energy*) набагато менше.

Мета цього дослідження - це визначення властивостей гібриду павловнії енерджі, що вирощується в Україні, які є обов'язковими умовами застосування цієї деревини в різних галузях.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Українські посіви створювалися насамперед з метою вирощування розсадників для дослідних та енергетичних досліджень. З цієї причини старіша, зріліша деревина була недоступна для визначення фізико-механічних характеристик. Піломатеріал, який послужить базовим матеріалом для зразків, був наданий компанією «Павлівня енерджі Україна, м. Луцьк.

Умови зростання дерева з якого виготовили піломатеріал для досліджень були такі: висота над рівнем моря 174 м; Середня річна температура коливається між 8-9 ° С, а середня багаторічна загальна річна кількість опадів становить близько 608 мм.

Відповідно до відповідних стандартів вивчалися такі об'єкти, що характеризують деревину:

- річна кільцева структура вивчалася на основі знімка спиляного ствола за допомогою програми Image Pro. При цьому ширина річного кільця визначалася за найменшим і найбільшим радіусом;
- фізико-механічні властивості.

Для досліджуваного піломатеріалу були визначені наступні властивості на основі відповідних стандартів: щільність [6], усушка та набухання [11], міцність на стиснення [10], міцність на зсув [8], статична міцність на [7], модуль пружності [6], міцність на вигин при ударі [9], твердість по Брінеллю [20].

Дослідження проводилися в стандартних кліматичних умовах ($T=20^{\circ}\text{C}$; $\varphi=65\%$) до рівноважної вологості – на зразках, що зберігаються. На Рис. 1 представлені зразки розміром 300 x 20 x 20 мм для стандартних випробувань на визначення межі міцності та модуля пружності при статичному згині.



Рис. 1. Зразки розміром 300 x 20 x20 мм для стандартних випробувань на визначення межі міцності та модуля пружності при статичному згині.

Оскільки конструкції з деревини навантажені, як правило, згинальними моментами, то величини межі міцності та модуля пружності при згині є одними з найважливіших споживчих властивостей тієї чи іншої деревини. При проведенні випробувань при статичному згині визначається модуль пружності та межа міцності.

Дослідження проводять згідно з ГОСТ 16483.9-73 ДЕРЕВИНА. Методи визначення модуля пружності при статичному згині. Wood. Методи для визначення modulus elasticity in static bending. Межа міцності згідно з ГОСТ 16483.3-84 Деревина. Метод визначення межі міцності при статичному вигині.

Зразок із закріпленим на ньому по нейтральній лінії приладом для вимірювання прогину в зоні чистого вигину навантажують за схемою, зображеною на рис. 2.

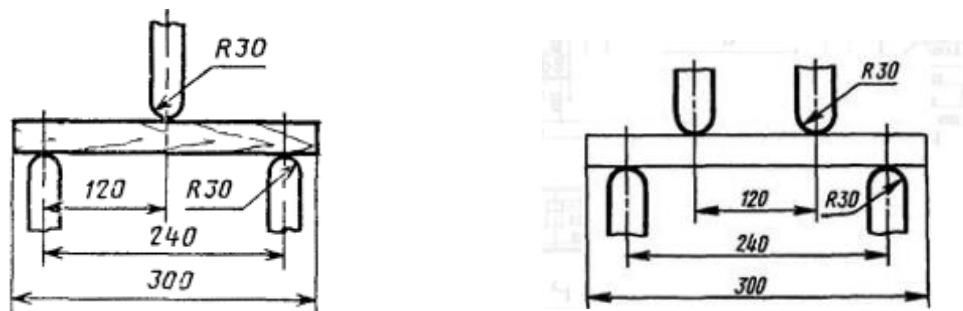


Рис. 2. Схема 3-х точкового (а) та 4-х точкового (б) випробувань деревини

Яка з цих схем навантаження точніше визначає деформацію деревини при згині, як правило, не виникає. Проте навіть із самих схем видно, що деформування відбувається по-різному. Метою проведення обчислювального експерименту було, - з'ясувати, яка зі схем навантаження краще визначає процес деформування. Для того щоб мати порівняні результати спочатку проводили випробування натурних зразків. При проведенні випробувань використовувалися зразки *Paulownia energy* розмірами 300 x 20 x 20 мм із вологістю МС 12%. Вологість та температура у приміщенні RH 65% та 20oC відповідно. Випробування проводили на розривній машині P5-M2 за спеціальною програмою. Усього було випробувано 20 образів. Результати одного із випробувань представлені на Рис. 3.

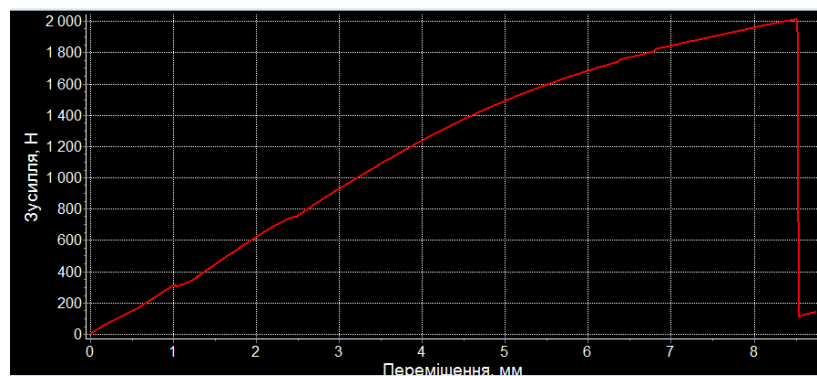


Рис. 3. Графік у координатах «переміщення – навантаження» при випробуваннях на вигин гібрида *Paulownia energy* за 4-точковою схемою навантаження

Модель будувалася за розмірами та умовами навантаження ідентичним тим, що приймалися при натурних випробуваннях. Результати імітаційного моделювання наведено на Рис. 4.

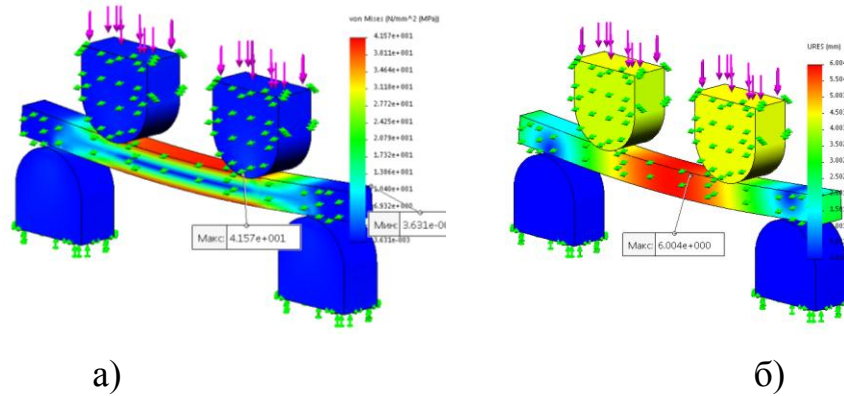


Рис. 4. Епюра напруг (а) та епюра переміщень (б) для випадку 4-х точкового вигину

Результати моделювання статичного вигину при застосуванні 3-х точкової схеми показано на Рис. 5.

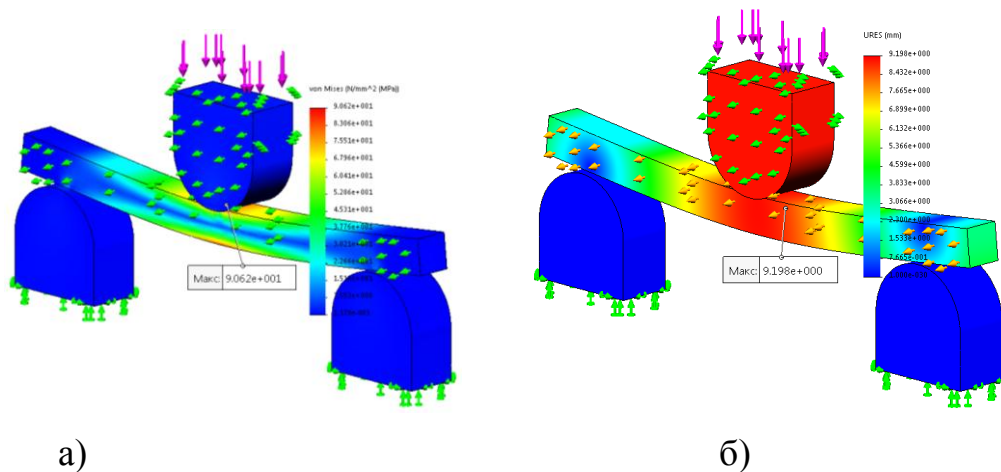


Рис. 5. Епюра напруг (а) та епюра переміщень (б) для випадку 3-х точкового вигину

Порівняння результатів машинних експериментів показує, що 4-точкова схема випробувань деревини на вигин дає набагато краще наближення до натурного експерименту, тому вона краща.

Випробування міцності на вигин виконувались за допомогою розривної машини моделі P5-M2 за схемою чотириточкового навантаження (Рис. 6) та на установці для випробування на ударну в'язкість по Шарпі на зразках серіями по 20 штук у кожній.



Рис. 6. Схема чотириточкового навантаження при дослідженні межі міцності та модуля пружності на розриній машині Р5-М2.

Зразки після випробувань на 4 = точковий вигин представлені на Рис. 7.



Рис. 7. Зразки, що пройшли випробування на чотириточковий вигин

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Річний приріст

Умови зростання дерева з якого виготовлялися зразки для випробувань, а також значення отримані в літературі для аналогічної породи представлені в Таблиці 1.

Таблиця 1 . Характеристика району виростання та дерева

Регион	Возраст, лет	Высота, м	Средняя температура, °С	Средние годовые осадки, кг/м ²	Средняя влажность, %
Луцк	8	174	10,2	65	65
Измир (Турция)	11	110	17,93	57,48	64

За рахунок ексцентричної структури досліджуваного зрізу, за найбільшим радіусом зростання більше приблизно на 30%, ніж за найменшим радіусом. Цикл збільшення швидкості зростання стає постійним починаючи з 5-го року (Рис. 8), при ширині річного кільця 1 см. Середня ширина річного кільця становить 14,7 мм у напрямі найбільшого радіусу, а напрямку найменшого - 8,3 мм.

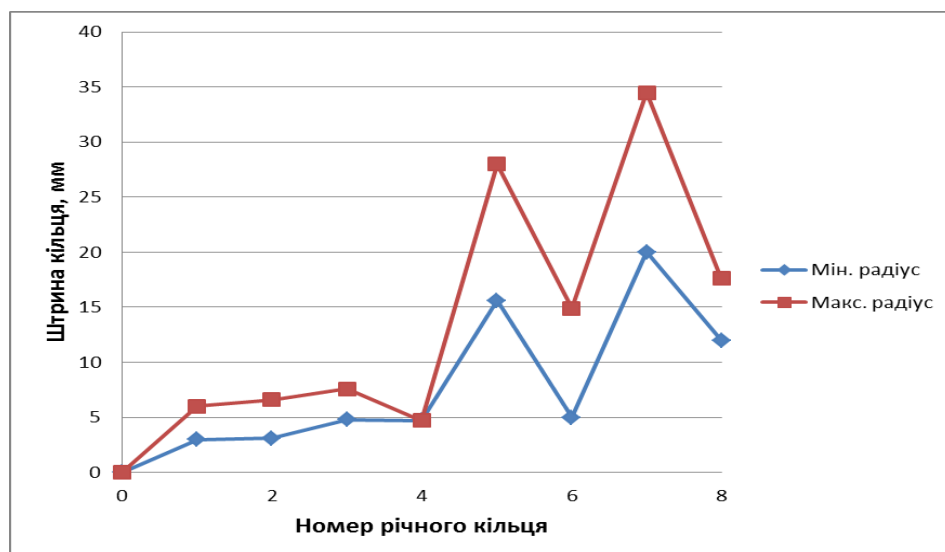


Рис. 8. Прирост в год, в координатах «ширина годового прироста (годового кольца) – номер годового кольца»

3.2. Щільність (густина)

Paulownia energy має яскраво виражену м'яку деревину, що підтверджує значення густини. Отримана повітряно-суха щільність (Таблиця 2) відповідає середньому значенню в літературі (Kanehira 1933, Senelwaa and Sims 1999, Flynn and Holder 2001, Kalaycioglu 2005, Акилдиз 2010). Ця низька щільність навіть не перевищує, наприклад, тополі.

Таблиця 2. Значення виміряних густин (кг/м³)

Сорт павловнії	Середнє	Мин.	Макс.	Станд.откл.
Павловнія енерджі	346,01	333,05	363,54	26,41
Література	300,18	262,33	360,18	26,59

3.3. Усадка-набухання

За результатами випробувань можна дійти невтішного зміни розмірів викликаними вологістю (Таблиця 3). По-перше, радіальні та тангенціальні значення є дуже сприятливими, які майже повністю відповідають повідомленням Мейєра (2015). Однак у зв'язку зі зміною розмірів обсягу вищі літературні значення більш ніж 10% можна знайти і навіть 20-30% (Акилдиз, 2010).

Таблиця 3. Усихання та набухання, %

	Вдоль волокон	Радиальное	Тангентальное	Объем
Усушка	0,69	2,20	3,89	6,94
Набухання	0,68	2,17	3,73	6,28

3.4. Твердість поверхні

Твердість по Брінель визначалася шляхом вдавлювання кульки діаметром 6,5 мм на розривній машині. Результати представлені на Рис. 9.

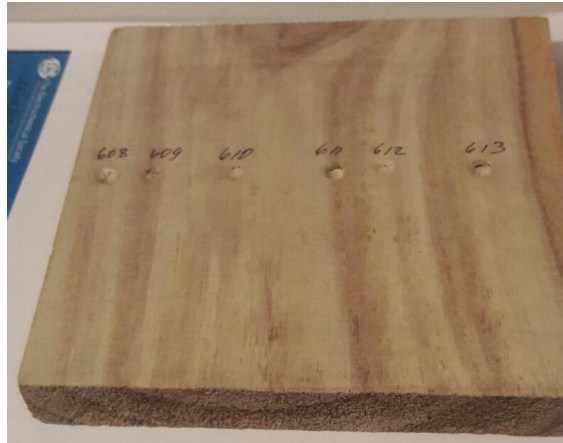


Рис. 9. Результати експериментів щодо визначення твердості

Вимірювання показали, що значення твердості різне для ранньої та пізньої деревини і склало 1,23 кг/мм² для ранньої та 1,55 кг/мм². У цілому нині значення твердості близько до твердості сосни – 1,6 кг/мм².

3.5. Прочність

При проведенні випробувань використовувалися зразки *Paulownia energy* розмірами 300 x 20 x 20 мм із вологістю МС 12%. Вологість та температура у приміщенні RH 65% та 20°C відповідно. Випробування проводили на розривній машині P5-M2 за спеціальною програмою. Усього було випробувано 25 образів. Вихідні дані та результати розрахунків представлені в таблиці 4.

Таблиця 4. Вихідні дані, результати випробувань та результати розрахунків межі міцності MOR та модуля пружності MOE

№	b, мм	h, мм	L, мм	V см ³	W, г	ρ г/см ³	P max, N	MOR, MPa	MOE, MPa
528	20,76	20,82	300,1	129,7	45,3		2138,0	60,6	4929,7
	20,71	20,88	300,1	129,8	45,3		240,0		
	20,83	20,91	300,1	130,7	45,3				
				130,1	45,3	0,348			
529	20,91	20,82	300,1	130,6	47,4	0,363	2485,0	65,8	5688,7
530	20,75	20,81	300,1	129,6	43,6	0,337	2266,0	60,5	5234,9
531	20,64	20,81	300,1	128,9	45,5	0,353	2509,0	67,4	5827,2
532	20,83	20,9	300,1	130,6	46,0	0,352	1913,0	50,5	4345,8
533	20,95	20,77	300,1	130,6	43,2	0,331	2012,0	53,4	4630,4
534	19,4	20,9	300,1	121,7	41,0	0,337	2138,0	60,6	5215,0
						0,346		59,7	5157,0

Через низьке значення щільності матеріалу слід, що загальні показники міцності теж невисокі. Це підтверджується отриманими результатами, представленими в Таблиці 5 та 6.

Таблиця 5. Механічна міцність деревини Павлівні Енерджі, МПа.

Вид випробування		Середн.	Мін.	Макс.	Ст. відх.
Стиснення вздовж волокон		39,9	37,5	41,3	4,23
Розтягування вздовж волокон		50,15	48,5	52,1	5,6
Зсув упоперек волокон		8,15	7,5	9,5	0,98
Межа міцності при згині		59,7	50,5	67,4	4,68
Модуль пружності при згині		5157	4344	5827	472
Твердість по Бриннелю, кг/мм ²	Уздовж	2,74	2,4,56	2,8,75	0,26
	Тангентальне	1,62	1,35	1,72	0,25
	Радіальне	1,53	1,39	1,69	0,25
	Рання	1,23	1,35	1,53	0,24
	Пізня	1,55			
Ударна згинальна міцність, (Дж·см ⁻²)		1,59	1,27	1,90	0,17

Таблиця 6. Порівняння цього дослідження з попередніми

Назва	Щільність, г/см ³	Межа міцності при вигині, МПа	Модуль пружності при згині, МПа	Міцність при стисканні, МПа	Джерело
Paulownia energy	0,346	59,71	5157,23	39,9	Polissia univer
P. elongata (İzmir)	0,281	35,79	3883,14	36,70	Bu çalışma
P. elongata (Mersin)	0,266	35,79	3523,42	35,56	Kaymakci, 2010
P. elongata (Sakarya)	0,271	23,98	2651,53	34,23	Kaymakci, 2010
P. tomentosa	0,317	43,56	4356	25,55	Akyildiz, 2010
P. fortunei	0,309	39,72	4917,8	-	Anonymous, 1984

Значення міцності дослідженої павловнії в одних випадках збігаються, в інших ці випадки більш менш відхиляються від зазначених іншими. Значення міцності на вигин як найбільш важливі характеристики міцності практично ідентичні значенням, знайденим у деяких літературних джерелах [2, 19, 23].

Щодо міцності на стиск, середнє значення 39,9 МПа можна вважати дуже добрим. Отримане середнє значення міцності на зсув може бути навіть на 20% вище, ніж у деяких ранніх дослідженнях [23, 3].

Визначення значень міцності на розрив зазвичай виконується рідко у разі перевірка деревних матеріалів, на відміну, наприклад, міцність на вигин або стиснення. У цьому випадку дуже високе значення відхилення було пов'язане із відносно низькою (50,15 МПа) міцністю.

Визначення значень твердості по Брінеллю дозволяє зробити висновок про те, що осьова твердість (вздовж волокон) майже втричі більша за значення бічної твердості (радіальної та тангентальної), які практично збігаються.

3.6. Теплофізичні властивості

Вимірювання коефіцієнта теплопровідності визначалося методом стаціонарного теплового потоку.

Метод стаціонарного теплового потоку (СТП) є технологічно простим методом дослідження температурної залежності коефіцієнта теплопровідності. Метод заснований на пропусканні температурного потоку через досліджувану структуру та через еталон з відомим коефіцієнтом теплопровідності. В ході експерименту вимірюється температура граней зразка і еталона і відносної різниці виміряних температур обчислюється коефіцієнт зв'язку між величинами $\lambda_{\text{sample}} = \beta \cdot \lambda_{\text{standard}}$.

Обмежимося трьома пластинами, причому нехай дві з них будуть з однаковими товщинами та із заданим, причому з високою точністю, значенням коефіцієнтом теплопровідності λ_{st} – еталонні структури (Рис. 10).

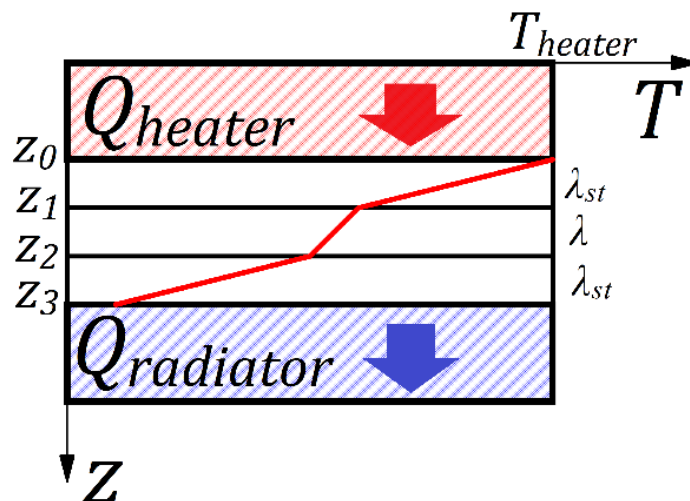


Рис. 10. Система, що складається з трьох плоскопаралельних пластин, дві з яких є еталонними.

$$\begin{cases} \lambda_{st} \frac{T(z_1) - T(z_0)}{z_1 - z_0} = \lambda_1 \frac{T(z_2) - T(z_1)}{z_2 - z_1}, \\ \lambda_{st} \frac{T(z_3) - T(z_2)}{z_3 - z_2} = \lambda_2 \frac{T(z_2) - T(z_1)}{z_2 - z_1}. \end{cases} \quad (3)$$

где $\lambda_{1,2}$ – коефіцієнт теплопровідності досліджуваної структури, розрахований з порівняння з першим та другим еталоном відповідно; $(z_1 - z_0), (z_2 - z_1), (z_3 - z_2)$ – товщина першої, другої та третьої пластин, відповідно. Тоді підсумковий коефіцієнт теплопровідності висловиться формулою: $\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$.

Таким чином, при дотриманні сформульованих вище обмежень вимірювання коефіцієнта теплопровідності зводиться до вимірювань температур на межах нагрівач-еталон, еталон-зразок, зразок-еталон, еталон-радіатор, товщин еталонів і зразка.

Температура нагрівача задавалася постійною за допомогою терморегулятора і дорівнювала 100°C . Температура радіатора також була постійною, і підтримувалася охолодження конвективним потоком повітря з температурою 20°C . Загальна схема експерименту представлена на Рис. 11.

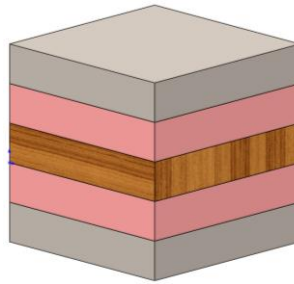


Рис. 11. Схема експерименту із встановленою між двома еталонами із сосни пластиною з PAULOWNIA ENERGY.

Результати дослідів. На Рис. 12 представлені середні теплові епюри розподілу температури, побудовані за результатами експериментів.

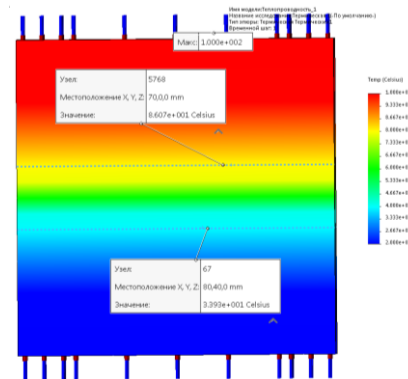


Рис. 12. Розподіл температур у пакеті пластин у стаціонарному стані через 600 с після початку експерименту.

Розрахуємо теплопровідність виходячи з отриманих даних (Рис.3) та формул (3) та значення $\lambda_{сосна} = 0,2256 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$:

$$\lambda_1 = \lambda_{сосна} \cdot (20 - 33,93) / (33,93 - 86,07) = 0,0612 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$$

$$\lambda_2 = \lambda_{сосна} \cdot (86,07 - 100) / (33,93 - 86,07) = 0,0622 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$$

Разом: $\lambda_{павловния\ энержи} = 0,0617 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

РОЗДІЛ 4. РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПРОМИСЛОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ

4.1. Переваги гібриду paulownia energy при виготовленні дерев'яних євровікон

Літературні дані та результати проведених у світі досліджень свідчать про те, що гібриди павловнії в основному невибагливі, мають високу врожайність і можуть бути вирощені відносно просто. Добре відтворюється із зернового, кореневого черешка (за деякими даними також з обрізка втечі), за сприятливих умов може досягати діаметра стовбура 30-40 см, висоти 10-12 м та врожайність деревини 0,2–0,6 м³ до 10-річного віку .

Дерево Paulownia tomentosa (або його відома назва – дерево китайської імператриці; павловнія опушена) – класифікується як одна з найшвидших порід деревини у світі з точки зору зручності використання. Її вирощування в Україні у вигляді дослідницьких плантацій лише розпочалося в останнє десятиліття, насамперед для дослідження можливості використання її енергетичних властивостей.

Тому інформація, що відноситься до фізико-механічних властивостей цієї деревини, досі повністю не визначена і достатньо суперечлива. Досліджена деревина *Paulownia tomentosa* яку вирощують наприклад в Угорщині з повітряно-сухою щільністю 0,3 г/см³ показала низьку згинальну міцність (42 МПа), стиснення (22 МПа), зсув (7 МПа), розтяг (33 МПа) та ударна в'язкість (1,6 Дж/см²) значення, на основі яких цей дерев'яний матеріал можна порівняти з тополями. враховуючи деревини в цьому регіоні.

Результати випробувань показали, що *Paulownia tomentosa* має м'яку, але міцну деревину хорошої якості. Деревина павловнії була визнана придатною для областей з низькою міцністю, таких як упаковка, підлога та виробництво меблів.

На думку деяких дослідників, властивості деревного матеріалу *Paulownia tomentosa*, що вирощується в Україні, не мають суттєвого відхилення, пов'язаного з вирощуванням в інших частинах світу. Вважається що через свою низьку щільність (повітряне сушіння: 300 кг/м³) її показники міцності не підходять для конструкційних цілей.

Однак вона може скласти серйозну конкуренцію широколистяним породам дерев, насамперед через характеристики швидкості зростання. На підставі наших досліджень її властивості можна порівняти насамперед із гібридними тополями. Щільність деревини гібридних тополь становить 300-400 кг/м³. Вирощування досвіду та поточні дослідження, пов'язані з фізико-механічними властивостями деревних матеріалів допоможе встановити більш значне поширення виду в регіоні.

Одна з особливостей *Paulownia* – це її низька теплопровідність внаслідок низької щільності. У досліджених порід вона становить величину коефіцієнта теплопровідності, що дорівнює в середньому $\lambda = 0,06 \dots 0,09$ Вт/м·К, що як мінімум у 2...3 рази менше, ніж у сосни.

Виходячи з особливостей властивостей теплопровідності, нами було запропоновано конструкцію дерев'яного тришарового клеєного бруса для

виробництва євровікон. Рис. 1 представлений один з можливих варіантів такого бруса, згідно з європейським стандартом, перетином 78 x 82 мм. При цьому товщина середнього шару становить 28 мм, тоді як зовнішні шари 25 мм.

Не знижуючи істотно механічної міцності євробруса, ми можемо збільшити тепловий опір євровікон шляхом заміни середнього шару на павловнію енерджі.

Проаналізуємо таку можливість і проведемо розрахунок багатошарової стінки, яка буде математичною моделлю нашого євробруса (Рис. 13).

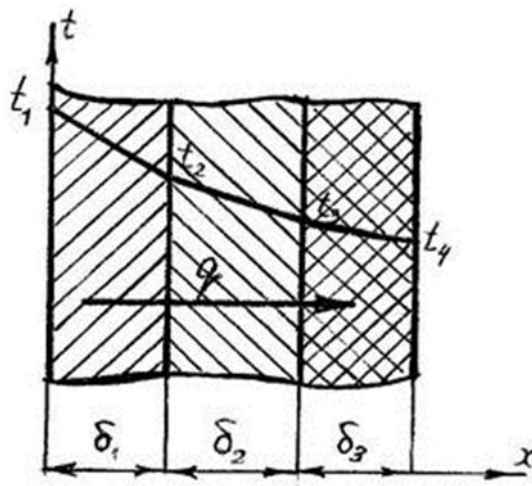


Рис. 13. Тришарова плоска стінка

Розглянемо тришарову стінку (рис. 13), що складається з трьох шарів, що щільно прилягають один до одного, з товщинами d_1 , d_2 , d_3 . Кожен шар характеризується своєю постійною теплопровідністю λ_1 , λ_2 та λ_3 відповідно. Відомі також температури зовнішніх поверхонь t_1 та t_4 . Тепловий контакт між шарами - ідеальний, без зазорів і без повітряних прошарків, температури в місцях контакту шарів позначаємо t_2 і t_3 .

Оскільки температури зовнішніх поверхонь незмінні, тепловий потік - який встановився, і, відповідно, кількість теплоти, що проходить в одиницю часу - постійно. При стаціонарному режимі питомий тепловий потік q постійний і всіх шарів однаковий. Тому можна записати для кожного з шарів:

$$q_1 = \frac{\lambda_1}{d_1}(t_1 - t_2); q_2 = \frac{\lambda_2}{d_2}(t_2 - t_3); q_3 = \frac{\lambda_3}{d_3}(t_3 - t_4)$$

Вирішуючи разом три рівняння отримаємо:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} = \frac{\lambda_{\text{экв}}}{d_1 + d_2 + d_3}(t_1 - t_4),$$

звідки:

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}}$$

Підставляючи відомі значення параметрів отримаємо: $\lambda_{\text{экв сосна}} = 0,18 \dots 0,23$ Вт/м·К ; $\lambda_{\text{экв сосна + павловния}} = 0,104$ Вт/м·К.

З співвідношення теплоємностей видно, що виготовлення середнього шару Paulownia Energy дозволяє знизити теплоємність віконного бруса в середньому в два рази.

4.2. Дослідження міцності складальних з'єднань вузлів меблів з гібрида paulownia energy

Можливість використання швидкозростаючих порід деревини багато в чому залежить від їх споживчих властивостей. Оскільки фізико-механічні властивості не досліджені, метою дослідження було визначити можливість використання PAULOWNIA ENERGY при виготовленні меблів. Для цього проводили випробування на міцність складальних меблевих з'єднань. Випробування проводили згідно з ГОСТ 16483.33-77 ДЕРЕВИНА. Метод визначення питомого опору висмикування цвяхів та шурупів. Wood. Метод для визначення резистивності до бавовни і woodscrew withdrawal.

У зразок перпендикулярно його поверхні в радіальному, тангенціальному та поздовжньому напрямках забивають цвяхи або загвинчують шурупи у кількості 6 шт за схемою розмітки зразка, зображеною на Рис. 14. Глибина забивання цвяхів (без загострення) – (30 ± 1) мм, загвинчування шурупів – (20 ± 1) мм.

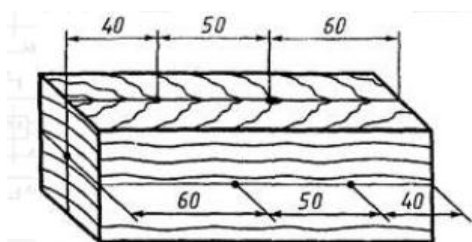


Рис. 14. Схема розмітки зразка для загвинчування шурупів

Шурупи загвинчують у попередньо висвердлені отвори. Діаметр отвору під шуруп повинен дорівнювати 2 мм для порід із щільністю деревини, меншою 600 кг/м^3 , 3 мм - для порід із щільністю від 600 до 700 кг/м^3 та 3,5 мм - для порід із щільністю, більшою за 700 кг/м^3 . Глибина свердління має бути (15 ± 1) мм.

Вологість зразків під час проведення випробувань МС 12%. Температура та вологість у приміщенні 20°C та RH 65% відповідно. Для того, щоб можна було порівняти отримані результати, випробування проводилися на сосні та дубі.

Для проведення випробувань використовували: випробувальну машину РМ-5М за ГОСТ 28840 з похибкою вимірювання навантаження не більше 1 %; пристосування для висмикування цвяхів та шурупів; штангенциркуль за ГОСТ 166 з похибкою вимірювання трохи більше 0,1 мм; лінійку вимірювальну за ГОСТ 427 з похибкою виміру трохи більше 1 мм; обладнання для визначення вологості деревини згідно з ГОСТ 16483.7; шурупи за ГОСТ 1144 діаметром 6,0 мм, завдовжки 40 мм.

Питомий опір (Руд) деревини висмикування цвяхів (шурупів) при вологості (W) в момент випробування Н/мм обчислюють за формулою $R_{уд} =$

$F_{\max}/L$, де $F_{\max}$ - максимальне навантаження, Н; L – глибина загвинчування шурупа, мм. Результати обчислюють із точністю до 0,1 Н/мм.

Приклади графіків навантаження - переміщення для трьох порід представлені на Рис. 15.

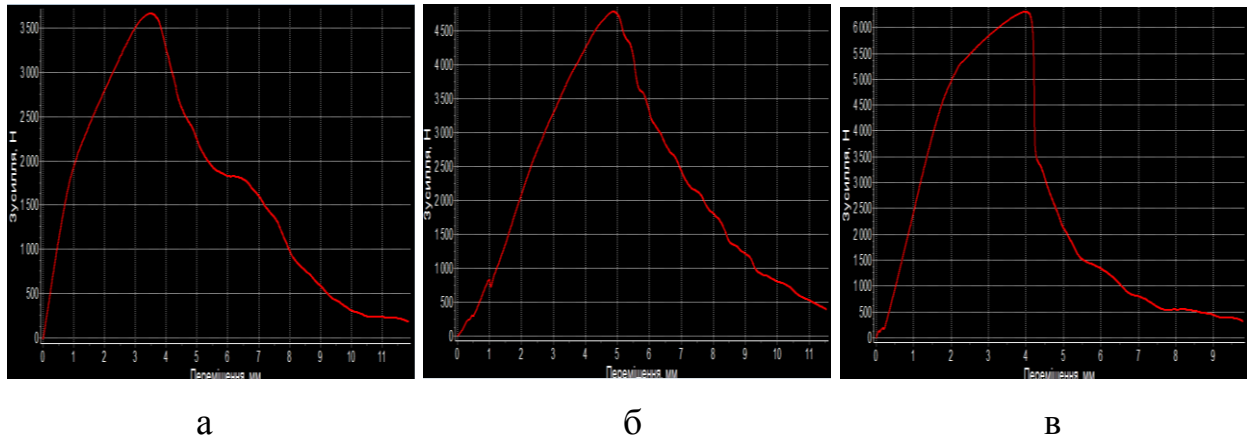


Рис. 15. Результати випробувань для трьох порід: - Paulownia energy;

б – сосна; в – дуб.

Питомий опір висмиканню шурупів:

$R_{\text{уд Paulownia energy}} = 3657/40 = 91,42 \text{ Н/мм}; (/340 = 0,269);$

$R_{\text{уд сосна}} = 4781/40 = 119,52 \text{ Н/мм}; (/450 = 0,266);$

$R_{\text{уд дуб}} = 6296/40 = 157,40 \text{ Н/мм}; (/700 = 0,225).$

Сравнивая прочность удерживания шурупа видно, что хотя у павловнии наиболее низкое значение 91,42 Н/мм, но если учитывать плотность, то эффективность удержания шурупа у павловнии больше.

4.3. Дослідження можливості виробництва меблевого щита з деревини гібрида paulownia energy

Швидкорослі дерева мають специфічні якості, як позитивні, так і негативні. Їхня відмінна риса в низькій щільності, яка у гібриду PAULOWNIA ENERGY становить у середньому 300 кг/м³. Низька щільність деревини цієї породи визначає її основні механічні та теплофізичні властивості і відтак області застосування. Так наприклад, у разі виготовлення з цієї породи

меблевого щита, крім властивостей міцності вона повинна володіти також досить високою здатністю водопоглинання, тобто добре вбирати рідини, що пов'язано з нанесенням захисно-декоративних покриттів.

Вимірювання водопоглинання проводилося шляхом повного занурення у воду зразків PAULOWNIA ENERGY щільністю 300 кг/м³ розміром 30х20х20 мм. Для порівняння використовувалися також зразки такого ж розміру сосни щільністю 450 кг/м³. Випробування проводилися згідно з рекомендаціями ГОСТ 16483.32-77 ДЕРЕВИНА. Метод визначення межі гігроскопічності. Результати випробувань подано на Рис. 1.

Як впливає з графіків крива водопоглинання добре описується логарифмічною кривою. Особливо високий коефіцієнт кореляції у павловнії, що говорить про тісний зв'язок щільності та швидкості водопоглинання.

Вміст води в павловнії та сосні визначимо за формулою:

$$W_{\text{павловнии}} = (W_{\text{тп}} - W_{0\text{п}}) / W_{0\text{п}} = (12.99 - 5.64) / 5.64 = 130\%$$

$$W_{\text{сосна}} = (W_{\text{тс}} - W_{0\text{с}}) / W_{0\text{с}} = (11.19 - 5.53) / 5.53 = 102\%.$$

Порівняємо вміст води за емпіричною формулою, яка пов'язує максимально можливий вміст вологи з щільністю деревини:

$$W = 30\% + ((1542 - \text{плотность, кг/м}^3) / 1542) \times 100\%,$$

$$W_{\text{п}} = 30\% + ((1542 - 300) / 1542) \times 100\% = 110 \%$$

$$W_{\text{с}} = 30\% + ((1542 - 450) / 1542) \times 100\% = 101\%.$$

Как видим, эмпирическая формула хорошо работает только для сосны. Тогда как для павловнии типовая формула требует уточнений.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Вперше отримані достовірні дані про механічні та теплофізичні властивості гібриду палонію енерджі.
2. Механічні та теплофізичні характеристики склали такі значення: швидкість радіального зростання після п'ятого року від 10 до 25 мм на рік; щільність – 346 кг/м³; межа міцності при згині – 59,71 МПа; модуль пружності при згині – 5157,23; міцність на стискування вдоль волокон – 39,9 МПа; міцність на стискування поперек волокон – 21,15 МПа; ударна згинальна міцність, 1,59 (Дж/см²); теплопровідність – 0,0617 Вт/м·К.
3. Порівняно з іншими гібридами, які вирощують в Україні та інших країнах, цей гібрид має підвищену щільність. У той же час швидкість його зростання така ж, як у відомих гібридів павловнії. Щільність у половині енерджі більша в середньому на 15%. Це дає цьому гібриду досить вагомі переваги на ринку пиломатеріалів.
4. Експерименти висмикування шурупів показали, що механічної міцності цілком достатньо для виготовлення меблів і будівельних елементів.
5. Гарні теплоізоляційні властивості дозволяють пропонувати нові багатошарові конструкції. Зокрема, при виробництві дерев'яних євровікон або інших елементів інженерної деревини, таких як CLT (cross laminate timber).
6. Незважаючи на свої недостатньо високі механічні характеристики, гібрид павловнію енерджі може у багатьох випадках замінити дорогу деревину, і тим самим знизити тиск на такі породи як сосна, вільха, осика та ін. Ця порода може скласти серйозну конкуренцію широколистяним породам дерев, насамперед через характеристики швидкості свого зростання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. AFBI, 2008: Павловнія як нова культура біомаси для Північної Ірландії? Огляд сучасних знань, випадкова публікація № 7. Інститут сільського господарства та біонауки, Хіллсборо.
2. Akyildiz, M.H., Kol, S.H., 2010: Деякі технологічні властивості та використання деревини павловнії (*Paulownia tomentosa* Steud.). Журнал біології навколишнього середовища (31): 351-355.
3. Бартон І.Л., Ніколас І.Д., Екройд К.Е., 2007: Павловнія. Вісник лісових досліджень No 231, 9 с. Роторуа, Нова Зеландія, Інститут лісових досліджень.
4. Bergmann, B.A., 1998: Метод розмноження впливає на виживання в перший рік поля та зростання Павловнії, *New Forests* 16(3): 251-264.
5. DIN 52188, 1979: Випробування деревини. Визначення граничного напруження при розтягуванні паралельно зерну
6. DIN 68364, 2003: Властивості порід деревини - Щільність, модуль пружності та міцності
7. DIN 52186, 1978: Випробування деревини - Випробування на згин
8. DIN 52187, 1979: Випробування деревини. Визначення граничного напруження зсуву паралельно зерну
9. DIN 52189, 1981: Випробування деревини - Визначення міцності при ударному вигині
10. DIN 52185, 1976: Випробування деревини - Випробування на стиснення паралельно зерну
11. DIN 52184, 1979: Випробування деревини - Визначення набухання та усадки
12. Флінн, Х., Холдер, К., 2001: Корисна деревина світу, Товариство лісових продуктів. Медісон, Вісконсін
13. Jun-Qing та ін. 1983: Дослідження властивостей деревини роду *paulownia*, *I. Scienta Silvae Sinicae* 19(1): 57-63.

14. Harvald, C., Olesen, P. O., 1987: Зміна основної щільності в межах молодої деревини ялини Сітка (*Picea sitchensis*). Сканувати. Дж. За. Res. 2: 525-53
15. Калайджиоглу, Х., Деніз І., Хізіроглу, С., 2005: Деякі властивості ДСП, виготовленої з павловнії, *J. Wood Sci.* 51: 410-414.
16. Канехіра, Р., 1933: Про легкі ліси. *J. Soc. Для. Японія*. У: Harzmann, L. J. 1988. *Kurzer Grundriß der allgemeinen Tropenholzkunde*. S. Hirzel Verlag, Leipzig 255 pp.
17. Кіаеї, М., 2013: Радіальна зміна статичного вигину деревини природних та вирощених на плантаціях стебел вільхи, *Cellulose Chem. Технологія*. 47 (5-6): 339-344.
18. Коман Ш., 2013: Анатомо-фізичні характеристики, що впливають на сучасне використання гібридних тополь у промислових та енергетичних цілях, Докторська дисерт. Університет Західної Угорщини, Шопрон.
19. Меєр, Є., 2015: Дерево. Визначення та використання сотень лісів у всьому світі, ISBN 978-0-9822460-3-0.
20. MSZ EN 1534, 2000: Дерев'яні та паркетні підлоги. Визначення стійкості до вдавлення (Брінель). Метод випробування.
21. Olson, J.R., Carpenter, S.B., 1985: Питома вага, довжина волокна та вміст екстракту молодої павловнії, *Wood and Fiber Science* 17(4): 428-438.
22. Senelwa, K., Sims R.E.H., 1999: Паливні характеристики лісової біомаси короткого обертання. Біомаса та біоенергія 17(2): 127–140.
23. Shim, C.S., 1948: Механічні властивості *Paulownia tomentosa* і *Paulownia Coreana* в Кореї, звіт лабораторії лісових продуктів, кафедра лісового господарства, Seoul Nat'l Univ. С. 1-20.
24. Ян, Х., 2004: Системи агролісоводства Павловнії в Китаї, Постер. Матеріали Міжнародної конференції з екоагратії та ярмарку практиків. Vol. 2: Тези конференції. Найробі 2004.
25. Бітій А., Б. Маросвельдь, 2012: A fajszi kísérleti *Paulownia* ültetvények újabb kutatási eredményei (Управління екологічними ресурсами та охорона та

екологічна співпраця), Дослідницький центр Non-profit Ltd, Шопрон (в Угорщині).

26. Walker, J.C.F., Butterfield, B.G., 1996: Зміна основної щільності в межах молодої деревини ялини Сітка (*Picea sitchensis*), *New Zealand Journal of Forestry* 40(4): 34–40.

27. Zhang, S. Y. (1997): Взаємозв'язок питомої ваги деревини та механічних властивостей на рівні виду, *Wood Science and Technology* 31(3):181-191.

33. Мамонтов Е.А. Проектирование технологических процессов изготовления изделий деревообработки: учебное пособие / Е.А. Мамонтов, Ю.Ф. Стрежнев. – Санкт-Петербург: «ПрофиКС», 2006. – 581с.

34. Гончаров Н.А., Башинский В.Ю., Буглай Б.М. Технология изделий из древесины. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 528 с.

35. ГОСТ 1146-80. Шурупы с полупотайной головкой // ИПК издат. стандартов. М.: 1982, 4 с.

36. Прокопович Б.В. Основи проектування столярно-меблевих виробництв: Навч. посібник / Б. В. Прокорович - К.: ІЗМН Міносвіти України. 1998. – 303 с.

37. Мец В. О. Економічний аналіз фінансових результатів та фінансового стану підприємства: Навч. посібник. / В. О. Мец – К.: КНЕУ, 1999. – 132 с.

38. Баканов М. И. Теория экономического анализа / Баканов М.И., Шеремет А. Д. – М.: Финансы и статистика, 1997. – 416 с

39. Шеремет А. Д. Теория экономического анализа: Учебник. / А.Д. Шеремет – М.: Инфра-М, 2002. – 333 с.

40. Житна І.П. Економічний аналіз господарської діяльності підприємств / І. П. Житна – К.: Вища шк., 1992. Мец В. О. Економічний аналіз фінансових результатів та фінансового стану підприємства: Навч. посібник. / В. О. Мец – К.: КНЕУ, 1999. – 132 с.

41. ГОСТ 1759.4-87 Болты, винты и шпильки механические свойства и методы испытания // ИПК издат. Стандартов. – М: 1997 г., 10 с.

42. ГОСТ 16483.23-73 Древесина. Метод определения предела прочности при растяжении вдоль волокон // ИПК издат. Стандартов. – М: 1973 г., 11 с.
43. Электронный ресурс: <http://matemonline.com/metki/mathcad/>.
44. Пижурин А.А. Исследование процессов деревообработки. – М: Лесная промышленность, 1984 – 232с.
45. Билей П.В., Никитюк Л.А. и др. Основы научных исследований технологических процессов д/о. Конспект лекцій, Львів, 1994.
46. Л.О.Никітюк. Наукові дослідження в д/о. Львів: 1994; 1995; 1997.