

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

РОКІТЕНЕЦЬ ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ

УДК 684.4.04

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ КЛЕСНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ ГРАТЧАСТИХ
КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ДЕРЕВ'ЯНОГО ДОМОБУДІВНИЦТВА

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

_____ О.В. Рокітенець

Керівник роботи
Кульман Сергій Миколайович
кандидат техн. наук, доцент

Висновок кафедри експлуатації лісових ресурсів
за результатами попереднього захисту: _____

Протокол засідання кафедри експлуатації лісових ресурсів та деревообробних
технологій № ___ від « ___ » _____ 2020 р.

Завідувач кафедри експлуатації лісових ресурсів та деревообробних технологій

к. б. н., доцент _____ Кратюк Олександр Леонідович
« ___ » _____ 2020 р.

Результати захисту кваліфікаційної роботи

Здобувач вищої освіти Рокітенець Олександр Вікторович
захистив кваліфікаційну роботу з оцінкою:

сума балів за 100-бальною шкалою _____

за шкалою ECTS _____

за національною шкалою _____

Секретар ЕК

_____ Білецька Наталія Миколаївна

АНОТАЦІЯ

Рокітенець О.В. Розробка і дослідження клеєних дерев'яних гратчастих конструкцій для дерев'яного домобудівництва. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 205 – лісове господарство. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

У роботі проаналізовано сучасний стан методів конструювання таких елементів конструкцій дерев'яного домобудівництва, які працюють на стиск, тобто колони, стійки, стрижні і гратчасті конструкції. Дан широкий аналіз існуючих способів посилення міцності властивостей стрижнів.

Застосування феномена моменту інерції плоских перетинів при проектуванні ГК дозволяє знизити загальну вагу за рахунок стійкості стиснутих стрижнів. Проведено прочностной аналіз підвищення стійкості стрижнів за допомогою методу скінченних елементів. Верифікація проведених розрахунків проводилася шляхом натурного експерименту, який їх повністю підтвердив. Проведені дослідження дозволили розробити і дати практичні рекомендації щодо використання способу.

Ключові слова: гратчаста конструкція, оптимізація конструкції, критерії оптимальності конструкцій, мінімізація ваги гратчастої конструкції

ANNOTATION

Rokitenets O.V. Development and research of glued wooden lattice structures for wooden housing. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for a master's degree in the specialty 205 – forestry. – Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

In master thesis methods for constructing such structural elements of wooden housing constructions, that work in compression, that is, columns, posts, rods and lattice structures has been analyzed. An extensive analysis of existing ways to increase the strength properties of the rods is given. The application of the phenomenon of the moment of inertia of flat sections in the design of LS allows to reduce the total weight due to the stability of the compressed rods.

Strength analysis of increasing the stability of the rods using the finite element method was performed. The verification of the calculations was carried out by an experiment *in situ*, which fully confirmed them. The research carried out made it possible to develop and give practical recommendations for using the method.

Key words: lattice construction, design optimization, design optimality criteria, minimization of lattice structure weight

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень існуючих способів підвищення стійкості ґратчастих конструкцій	6
1.1. Постановка проблеми	6
1.2. Аналіз останніх досліджень	7
1.3. Мета, завдання і методики дослідження	7
1.4. Аналітичні розрахунки можливості підвищення стійкості стиснутих стержнів ґратчастих конструкцій	8
2. Обчислювальний експеримент	11
2.1. Ціль та задачі обчислювального експерименту	11
2.2. Матеріал і методи дослідження	12
2.3. Результати і обговорення	14
2.4. Висновки та перспективи подальших досліджень	16
3. Верифікація математичної моделі ґратчастих конструкцій	16
3.1. Мета, об'єкт та предмет дослідження	16
3.2. Матеріали і обладнання	16
3.3. Методика випробувань	17
3.4. Результати і обговорення	18
3.5. Висновки та рекомендації	30
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	31
Перелік використаних джерел	31
Додатки	33

ВСТУП

Проектування і розрахунок гратчастих конструкцій (ГК) як правило проводиться на основі формул опору матеріалів. При цьому вирішується основне завдання проектування - створення безпечної конструкції, здатної витримувати допустимі навантаження протягом всього часу її експлуатації. В якості критерію оптимальності при цьому може бути прийнятий критерій мінімальної ваги конструкції.

ГК широко використовуються в сучасному будівництві. В основному для перекриття великих прольотів з метою зменшення витрати застосовуваних матеріалів і полегшення конструкцій, наприклад - в будівельних великопролітних конструкціях мостів, кроквяних систем промислових будівель, спортивних споруд.

Особливість ГК в тому, що стрижні яки працюють на стиск вибираються як правило більшого поперечного перерізу для запобігання втрати їх стійкості, що призводить до збільшення ваги всієї конструкції.

Застосування феномена моменту інерції плоских перетинів при проектуванні ГК дозволяє знизити загальну вагу за рахунок стійкості стиснутих стрижнів. Це досягається тим, що у гратчастої конструкції, стійки і розкоси виконані з матеріалу, геометрична форма поперечного перерізу якого має дві взаємно-перпендикулярні осі симетрії, а кінці стійок і розкосів повернені один відносно одного на кут кратний π радіан.

Виходячи з аналізу останніх досліджень гратчастих конструкцій метою дослідження ставилося розробка конструкції із зменшеною витратою матеріалів. Завданням дослідження було довести, що розроблена гратчаста конструкція дійсно зможе виконувати ті ж функції, що і її аналог при меншій витраті матеріалів.

При вирішенні поставленого завдання використовувалися наступні методики дослідження: визначення і порівняння допустимих навантажень при опорі стислих стрижнів ГК на стійкість за формулою Ейлера; висіслительний

експеримент в середовищі SolidWorks Simulation методом кінцевих елементів (МКЕ).

Об'єкт дослідження – клеєна дерев'яна гратчаста конструкція для дерев'яного домобудівництва.

Предмет дослідження – спосіб виготовлення клеєної дерев'яної гратчастої конструкції для дерев'яного домобудівництва.

Публікації по темі досліджень.

1. Рокітенець О. В. Гратчасті конструкції в дерев'яних домобудівлях. Проблеми ведення та експлуатації лісових і мисливських ресурсів: матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції присвяченої пам'яті професора А.І. Гузія. (Житомир, 25 вересня 2020 р.). Житомир, 2020, с. 172.

2. Рокітенець О. В., Кульман С. М. Исследование концепции устойчивого эко-дизайна при производстве деревянных решетчатых конструкций. III Всеукраїнська науково-практична конференція Сучасні екологічні проблеми урбанізованих територій. (Житомир, 10-11 листопада 2020 р.). Житомир, 2020, с. 61-62.

3. Кульман С. М., Рокітенець О. В. Применение концепции устойчивого эко-дизайна при проектировании изделий из древесины. Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених «Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції», 12 листопада 2020 року. – Житомир: «Житомирська політехніка», 2020. – с. 44.

Практичне значення отриманих результатів. Результати досліджень повністю підтвердили гіпотезу про можливість підвищення стійкості ГК при застосуванні запропонованого способу, що дає можливість пропонувати домобудівній компанії почати випускати продукти ринкової новизни.

Структура та обсяг роботи. Работа содержит 28 страниц основного текста, 19 рисунков, 3 таблиц, и 7 приложений.

1. Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень існуючих способів підвищення стійкості ґратчастих конструкцій

1.1. Постановка проблеми

Конструкції мінімально можливої ваги завжди привертали до себе тих хто займається розробкою нових виробів або конструює деталі машин. Адже для їх створення можна застосувати менше матеріалу і таким чином здешевити, а значить конкурувати з аналогами.

Особливу увагу до конструкцій мінімального обсягу витрачається матеріалу стало проявлятися в останні десятиліття у зв'язку зі створенням та початком широкого використання нових типів технологій, названих аддитивними [1].

На відміну від традиційних технологій формоутворення виробів шляхом зняття припуску, тобто вивільнення кінцевої форми деталі з заготівлі, адитивні технології здійснюють зворотний процес формоутворення - відразу створюють деталь або виріб потрібної форми. Існує кілька інноваційних видів адитивних технологій: FDM (Fused deposition modeling) - виріб формується пошарово з розплавленої пластикової нитки. SLS (Selective Laser Sintering) - технологія лазерного запікання, при якій утворюються особливо міцні об'єкти будь-яких розмірів.

Оскільки матеріали, які використовуються в цих технологіях поки не дешеві, то конструкція мінімального обсягу безпосередньо пов'язана з ціною виробу. Таким чином, створення конструкцій мінімальної ваги і зберігають при цьому виконання їх несучих функцій є актуальним завданням при конструюванні ГК [7].

1.2. Аналіз останніх досліджень

Відома гратчаста конструкція, що включає пояса таврового перетину і трикутну решітку, розкоси якої прикріплені до стінки тавра черзі з одного і з іншого боку [2].

Недолік конструкції полягає в наявності ексцентриситету з площини конструкції і неможливості застосування інших перетинів поясів.

Відома конструкція, що включає пояса коробчатого перетину, стійки і елементи перехресного решітки, розташовані зліва і праворуч перетину конструкції [3].

Недолік конструкції полягає в значному ексцентриситеті з площини конструкції при кріпленні розкосів і великий многодельності при виготовленні хрестових розкосів.

Відома гратчаста конструкція, що включає верхній і нижній пояси, з'єднані між собою трикутної ґратами, що складається зі стійок і розкосів, по черзі розташованих зліва і справа відносно вертикальної площини симетрії поперечного перерізу конструкції. Перетин поясів і стійок конструкції виконується переважно коробчатого перетину, а розкоси прийняті з куточків [4].

Недолік конструкції полягає в великому ексцентриситеті кріплення розкосів, що в кінцевому підсумку збільшує витрату матеріалів.

1.3. Мета, завдання і методики дослідження

Виходячи з аналізу останніх досліджень гратчастих конструкцій, метою дослідження ставилося розробка конструкції із зменшеною витратою матеріалів.

Завданням дослідження було довести, що розроблена решітчаста конструкція дійсно зможе виконувати ті ж функції, що і її аналог при меншій витраті матеріалів.

Авторське право на «Гратчасту конструкцію» належить Поліському національному університету і захищено патентом України № 119413 [6]. Попередні (пілотні) розрахунки були проведені в 2019 році в лабораторії фізико-механічних випробувань кафедри експлуатації лісових ресурсів і деревообробних технологій ПНУ. Однак дані розрахунки були зроблені тільки одного класу граничних умов, тому для розширення можливостей практичного використання методу було вирішено провести більш детальні розрахунки для стрижнів різних конструкцій.

При вирішенні поставленого завдання використовувалися наступні методики дослідження: визначення і порівняння допустимих навантажень при опорі стислих стрижнів ГК на стійкість за формулою Ейлера; обчислювальний експеримент в середовищі SolidWorks Simulation методом кінцевих елементів (МКЕ).

1.4. Аналітичні розрахунки можливості підвищення стійкості стиснутих стержнів гратчастих конструкцій

Результат досягається тим, що в гратчастій конструкції, що включає верхній і нижній пояси, з'єднані трикутної ґратами, що складається зі стійок і розкосів, по черзі розташованих зліва і справа відносно вертикальної площини симетрії поперечного перерізу конструкції, стійки і розкоси виконані з матеріалу, геометрична форма поперечного перерізу якого має дві взаємно-перпендикулярні осі симетрії, а кінці стійок і розкосів повернені один відносно одного на кут кратний π радіан.

На рис. 1.1 зображений фрагмент гратчастої конструкції з поясами з таврів. На рис. 1.2 наведений поперечний розріз Б-Б стійки виготовленої зі смуги на рис. 1.1.

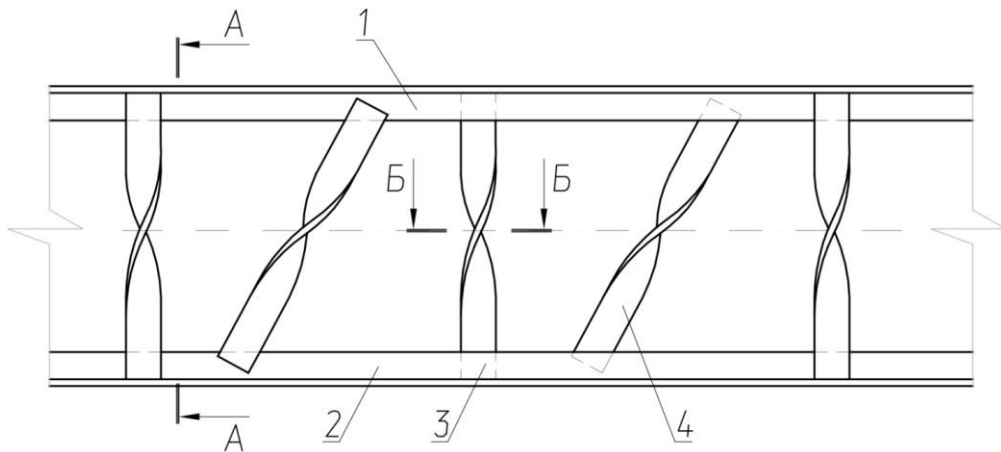


Рис. 1.1. Фрагмент ґратчастої конструкції з поясами з таврів

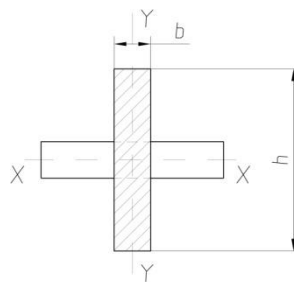


Рис. 1.2. Перетин Б-Б на Рис. 1.1 (М 5: 1)

Переваги ґратчастої конструкції досягаються в такий спосіб. При роботі даної конструкції стрижні 1 і розкоси 2 піддаються стиску навантаженні. Величина граничної критичного навантаження визначається формулою Ейлера:

$$P = k\pi^2 \frac{EJ}{L^2},$$

де k - коефіцієнт, який враховує умови закладення кінців стрижня або раскоса;

E - модуль пружності матеріалу стрижня;

J - геометричний момент інерції площі поперечного перерізу стрижня;

L - довжина стрижня.

При деформації стрижня максимальний прогин, і, отже, місце максимальних пружних деформацій буде розташовано в середині довжини стрижня. У разі проектування конструкції з урахуванням мінімальної витрати матеріалу, тобто полегшеною ґратчастої конструкції, як наприклад в розглянутому нами випадку, нам необхідно збільшити момент інерції стрижня в перерізі, яке розташоване в його середині. Для досягнення цього кінці стрижня

розгортаються одна відносно одної на величину, кратну π радіан. При цьому величина, яка характеризує підвищення стійкості стрижня, буде дорівнює:

$$\varphi = \frac{J_y}{J_x},$$

де φ - коефіцієнт підвищення стійкості стрижня;

J_y – геометричний момент інерції площі поперечного перерізу відносно осі у-у;

J_x – геометричний момент інерції площі поперечного перерізу відносно осі х-х;

Так, наприклад, для прямокутного перерізу стержня:

$$\varphi = \frac{J_y}{J_x} = \left(\frac{h}{b}\right)^2, \quad (1.1)$$

де h - ширина стрижня, м;

b - товщина стержня, м.

Оскільки маса стрижнів однакової довжини і матеріалу залежить від площі їх поперечного перерізу, тобто від твору, а підвищення стійкості від квадрата їх відносини, то застосовуючи даний винахід можна знизити масу стержня пропорційно квадрату зміни його ширини при постійній товщині. При цьому стійкість стержня залишиться без зміни.

Гратчаста конструкція складається з верхнього 1 і нижнього 2 поясів, наприклад таврового профілю, з'єднаних трикутної ґратами, що складається зі стійок 3 і розкосів 4. Кінці стояків 3 і розкосів 4 прикріплені до стінок таврового перетину поясів.

Виготовлення конструкції здійснюється наступним чином. Пояси 1 і 2 конструкції, виконані, наприклад, з таврового профілю, з'єднують за допомогою зварювання стійками 3 і розкосами 4, виконаними наприклад прямокутного поперечного перерізу. Стійки 3 і розкоси 4 орієнтують більшою стороною прямокутного профілю уздовж поясів конструкції, при цьому парні і непарні стійки встановлюють з різних сторін стінки таврового профілю поясів. Зібрана гратчаста конструкція має мінімальний ексцентриситет з площини, що

дорівнює товщині перетину стінки тавра, а також мінімальний витрата матеріалу на її виготовлення.

Щоб підтвердити або спростувати цю гіпотезу були обрані два шляхи. Перший - провести обчислювальний розрахунковий експеримент на комп'ютері. Другий - провести верифікацію обчислювального експерименту шляхом натурального експерименту *in situ*.

2. Обчислювальний експеримент

Проведення обчислювального експерименту було здійснено шляхом побудови 3-D моделі кінцевих елементів були з використанням комерційного коду *SolidWorks Simulation* для моделювання поведінки прямобічних стійок (стрижней). Деревина стрижней моделювалася як ортотропний лінійний пружний матеріал при розтягуванні і стисненні. Були змодельовані умови закріплення кінців стрижнів.

2.1. Ціль та задачі

Метою даного дослідження, є вивчення властивостей гратчастих конструкцій шляхом моделювання їх механічної поведінки під навантаженням з використанням методу скінченних елементів і перевірки отриманих розрахункових моделей на спеціальному стенді.

Тривимірні моделі кінцевих елементів були розроблені для імітації стійкості (згинальної жорсткості) прямолінійних і кручених прямокутних стрижнів.

2.2. Матеріали та методи

Щоб спростити модель, деякі параметри були проігноровані, такі як спотворення в волокнах, зміна температури і щільності. Хоча у деревини існують різні швидкості деформації і коефіцієнти деформації в 3-х напрямках L, R і T ними нехтували.

Взаємодія стрижня з опорою моделюється шляхом визначення як дотичної, так і нормальної поведінки контакту. Формула тертя є «грубою» в тангенціальному поведінці і «жорстким контактом» для подолання тиску при нормальної поведінці.


Властивості матеріалу, використаного при моделюванні, були отримані з результатів експерименту за допомогою випробувань на стиснення.

В якості досліджуваного об'єкта в обчислювальному експерименті приймався вертикальний плоский прямий стрижень жорсткого закріплення з обох кінців розміром 104 x 6 x 2,4 мм з матеріалу, механічні властивості якого представлені в Таблиці 1. У першому варіанті це прямий стрижень, а в другому, - кручений стрижень, закріплені боки якого повернуті на 180 градусів. Навантаження вертикальне уздовж осі стрижня $P = 100 \text{ Н}$ в обох випадках. Результати дослідження прямого вертикального стрижня на стійкість в середовищі SolidWorks Simulation представлені в Таблиці 1.1.

Таблиця містить також інформацію про якість створюваної сітки кінцевих елементів, їх розміри, кількість і ступеня складності.

Програма видає результат ступеня стійкості у вигляді величини результуючої амплітуди першої форми коливань.

Таблица 1.1. Умови закріплення, властивості матеріалу, умови закріплення кінців і напрямок зовнішньої сили

Свойства материала		
Ссылка на модель	Свойства	Компоненты
	<p>Имя: Бальса Тип модели: <u>Линейный Упругий</u> <u>Изотропный</u> Критерий прочности по умолчанию: <u>Неизвестно</u> Предел текучести: 2e+007 N/m² Массовая плотность: 159.99 kg/m³ Модуль упругости: 3e+009 N/m² Коэффициент Пуассона: 0.29</p>	Твердое тело 1(Бобышка-Вытянуть5)(Прямой одинарный_10_2)
Данные кривой: N/A		
Информация о сетке		
Тип сетки	Сетка на твердом теле	
Используемое разбиение:	Стандартная сетка	
Автоматическое уплотнение сетки:	<u>Выкл</u>	
Включить автоциклы сетки:	<u>Выкл</u>	
Точки Якобиана	4 Точки	
Размер элемента	1.37576 mm	
Допуск	0.068788 mm	
Качество сетки	Высокая	
Информация о сетке - Детализация		
Всего узлов	14309	
Всего элементов	8228	
Максимальное соотношение сторон	5.1631	
% элементов с соотношением сторон < 3	99.6	
% элементов с соотношением сторон > 10	0	
% искаженных элементов (Якобиан)	0	
Время для завершения сетки (hh:mm:ss):	00:00:04	
Имя компьютера:	LENOVO-B50	

2.3. Результати та обговорення

Результати розрахунків у вигляді епюр деформації і величини коефіцієнта навантаження для прямого стрижня представлені на рис. 1.3. Протокол випробувань прямого стрижня показаний в Додатку А.

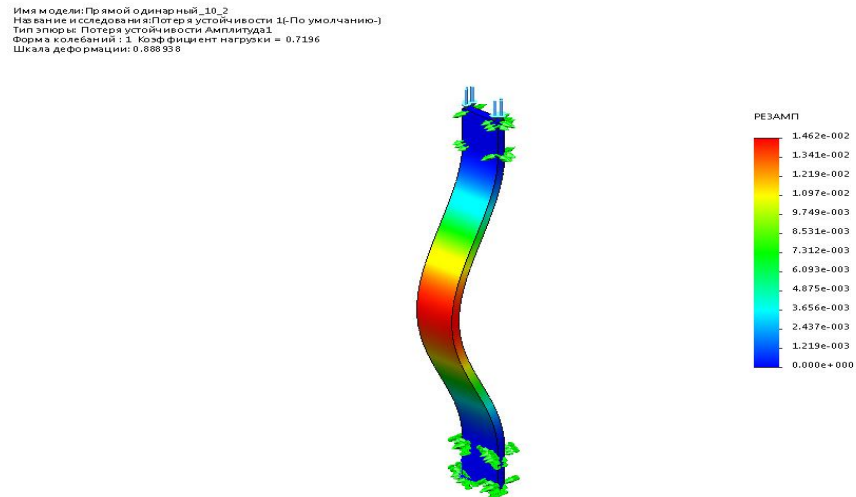


Рис. 1.3. Розрахована величина коефіцієнта навантаження КН і епюра деформацій для прямого стрижня

Результати дослідження крученого вертикального стрижня на стійкість представлені на рис. 1.4.. Протокол випробувань крученого вертикального стрижня показаний в Додатку Б.

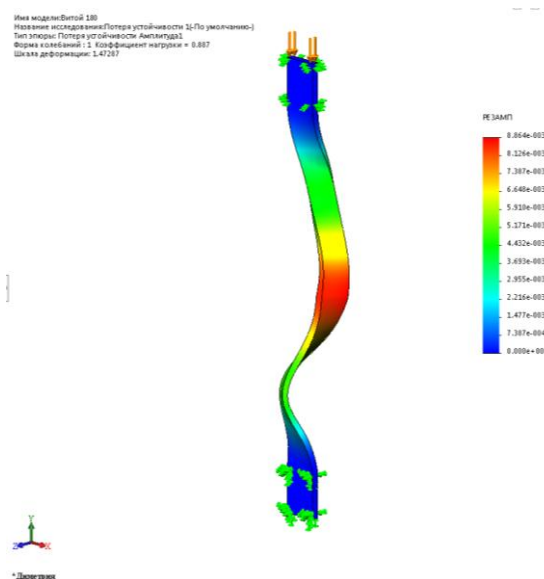


Рис. 1.4. Розрахована величина коефіцієнта навантаження КН і епюра деформацій для крученого вертикального стрижня

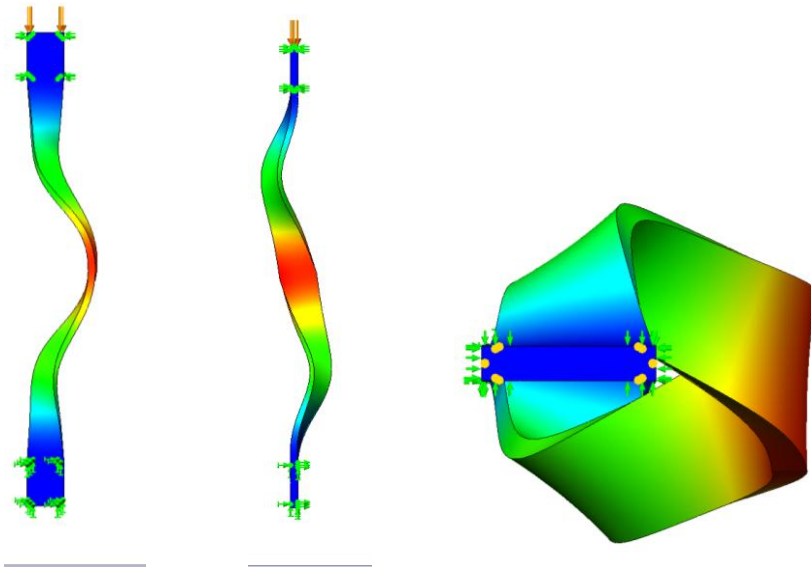


Рис. 18. Форма втрати стійкості крученого стрижня: спереду; ліворуч; зверху

Як бачимо перша форма втрати стійкості крученого стрижня представлена на Рис. 1.4, (тобто найбільш ймовірна) досягається при коефіцієнті навантаження, рівному

$$КН_{\text{вітой}} = 0,887$$

в той час як для прямого стержня (Рис. 1.3)

$$КН_{\text{прямой}} = 0,7196.$$

Це означає, що для прийнятого нами матеріалу і прийнятих умов його навантаження та закріплення підвищення стійкості:

$$\varphi = КН_{\text{вітой}} / КН_{\text{прямой}} = 0,887 / 0,7196 = 1,23.$$

У той же час розрахунки, згідно формули Ейлера (1.1) дають результат підвищення стійкості рівний:

$$\varphi = (6 / 2,4 / 2) 2 = 1,56.$$

Тобто, як бачимо при одних і тих же умовах закріплення кінців стрижнів результати отримані згідно формули (1.1) та експеримента незначно відрізняються. Хоча і в тому і в іншому випадку обчислювального експерименту стійкість крученого стрижня набагато вище, ніж прямого.

2.4. Висновки і перспективи подальших досліджень

1. Застосування феномена моменту інерції плоских перетинів при проектуванні ґратчастих конструкцій дозволяє створювати конструкції підвищеної стійкості тобто зниженої матеріалоемності.
2. При цьому ефект підвищення стійкості, наприклад для прямокутних перетинів, може бути збільшений приблизно на порядок.
3. Для отримання більш точних значень збільшення коефіцієнта стійкості потрібно провести натурні експерименти на спеціальному програмно-апаратному комплексі лабораторії механічних випробувань кафедри експлуатації лісових ресурсів ЖНАЕУ.

3. Верифікація математичної моделі ґратчастої конструкції

3.1. Мета, об'єкт та предмет дослідження

Мета натурального експерименту - підтвердити або спростувати результати обчислювальних експериментів.

Об'єкт дослідження - елементи ґратчастих конструкцій що працюють на стиск.

Предмет дослідження - залежність стійкості (згинальної жорсткості) елементів ґратчастих конструкцій від їх конструктивних особливостей.

3.2. Матеріали і обладнання

Матеріали. В якості вихідних матеріалів для виготовлення натурних моделей використовувалися тонкі плоскі ламелі з бука довжина 130 мм, шириною 6 мм, товщиною 1,2 мм и вологістю МС 6%, з яких виготовляли

зразки для проведення випробувань. Кручені стрижні виготовлялися склеюванням з двох прямих шляхом фіксації в скрученому стані.

Натурні моделі були вивчені для чотирьох типів стрижнів однакового розміру.

1 тип - одиночний прямий стрижень (ОПС).

2 тип - подвійний прямий стрижень (ППС). Розташовані поруч два стержня, не пов'язані між собою в активної частини.

3 тип - подвійний прямий клеєний стрижень (ППКС). Розташовані поруч два стержня, склеєних між собою в активної частини.

4 тип - подвійний кручений клеєний стрижень (ПККС).

При проведенні випробувань підтримувалася Постійна температура 20°C і вологість RH 65%.

3.3. Методика випробувань

Всі типи стрижнів досліджувалися на стійкість. Довжина активної частини стрижнів становила 104 мм. При цьому кожен з кінців стрижня мав жорстке кріплення розміром 13 мм по довжині.

Устаткування для проведення експериментів.

Всі випробування проводилися на розривної машині P5-M2 при постійній швидкості деформації 2 мм/хв за допомогою спеціального пристосування для випробування деревини на стійкість показанного на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Програмно-апаратний комплекс на базі розривної машини P5-M2



Рис. 3.2. Пристосування для випробувань на стійкість

Випробування проводилися в автоматичному режимі за допомогою спеціального програмного забезпечення.

3.4. Результати і обговорення

Результати експериментів в залежності від конструкції стрижня (змінний фактор експерименту) представлені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Результати натурних експериментів в залежності від конструктивних особливостей досліджуваних стрижнів

Тип стрижня	Номер зразка	Постійні фактори			Результати експериментів
		l, mm	b, mm	h, mm	Максимальне навантаження, (F), Н
ОПС ^a	1	103,4	6,19	1,22	26,2
	2	103,6	5,84	1,22	25,6
	3	104,2	5,85	1,23	26,6
	4	104,9	6,06	1,25	25,7
	5	105,0	6,18	1,15	25,4
	6	103,7	5,98	1,17	25,6
	Середнє	104,1	6,02	1,21	25,9

ППС ^b	1	103,1	5,86	2,48	64,0
	2	103,5	5,96	2,45	68,4
	3	103,2	5,81	2,47	66,7
	4	103,2	6,00	2,45	67,6
	5	103,0	6,03	2,42	65,1
	6	103,5	6,16	2,49	65,2
	Середнє	103,3	5,97	2,46	66,2
ППКС ^c	1	104,1	5,83	2,40	159,9
	2	104,0	6,12	2,45	183,5
	3	104,5	5,86	2,50	176,5
	4	105,0	6,00	2,44	164,8
	5	104,4	6,16	2,43	176,9
	6	103,3	5,99	2,40	176,0
	Середнє	104,2	5,99	2,44	172,9
ПККС ^d	1	103,8	5,96	2,42	257,0
	2	103,1	5,85	2,40	235,9
	3	103,3	5,87	2,40	249,0
	4	103,2	5,93	2,49	248,3
	5	103,8	6,06	2,40	241,2
	6	103,4	6,20	2,46	240,5
	Середнє	103,4	5,98	2,43	245,3

ОПС^a - одиночний прямий стрижень.

ППС^b - подвійний прямий стрижень. Розташовані поруч два стержня, не пов'язані між собою в активної частини.

ППКС^c - подвійний прямий клеєний стрижень. Розташовані поруч два стержня, склеєних між собою в активної частини.

ПККС^d - подвійний кручений клеєний стрижень.

На рис. 3.3 представлена одна з серій експериментів яка включає в себе номери експериментів, типи стрижнів, їх розміри і конструктивні особливості.

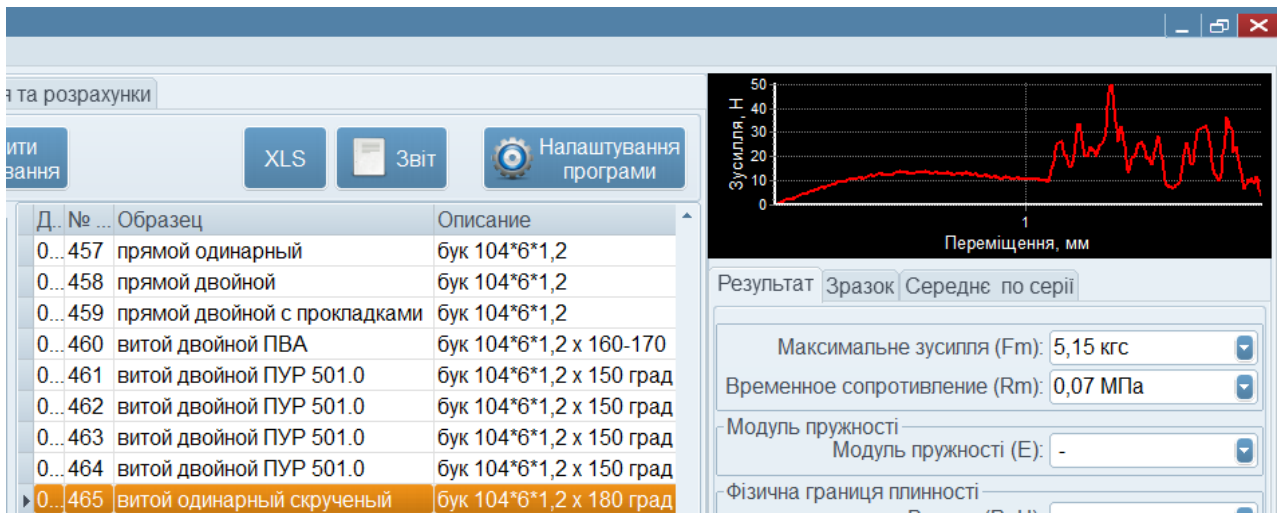


Рис. 3.3. Перша серія з шести експериментів яка включає різні типи стрижнів

На рис. 3.4 представлені експерименти першої серії для Стрижня конструкції ОПС (№457). Видно, що він опотерял стійкість і зігнувся в форму, яка повністю відповідає першій гармоніки відповідно до теорії стійкість стрижнів по Ейлеру.

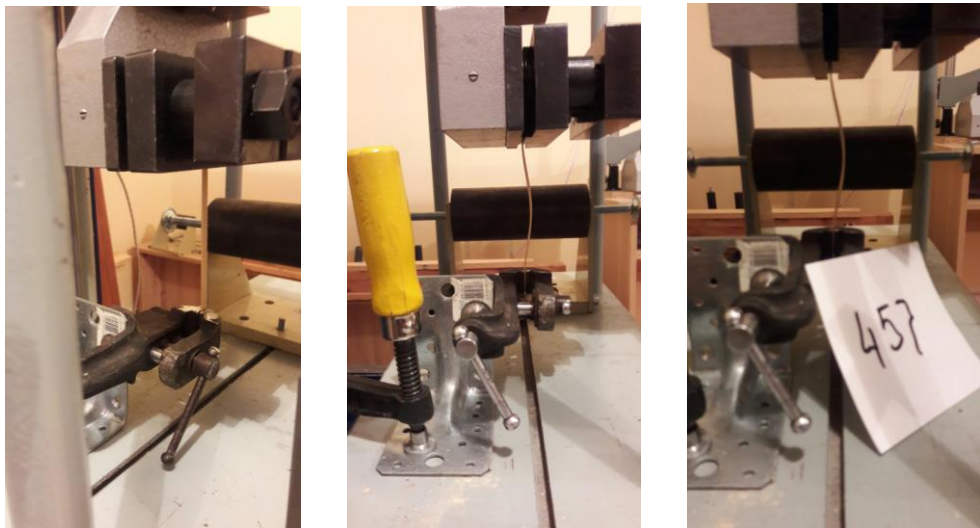


Рис. 3.4. Налагодження і деформування в часі стрижня конструкції ОПС - одиночний прямий стрижень.

На рис.3.5 Графік залежності сила - переміщення при проведенні експерименту на стійкість для ОПС - одиночний прямий стрижень. На графіку чітко видно, що на початку навантаження відбувається пружна деформація

стрижня (пряма ділянка). При досягненні певної величини завантаження відбувається поступове відхилення від прямої ділянки, потім досягнення максимальної величини навантаження і потім падіння сили опору стрижня зовнішньому навантаженню. Як бачимо максимальне навантаження склало 26,6 Н. Це значення і було занесено в табл. 3.2. (Зразок №3).

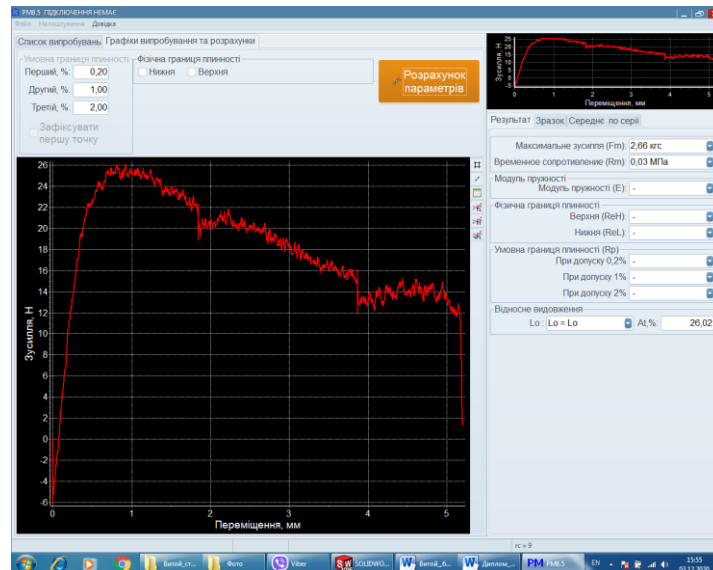


Рис. 3.5. Графік залежності сила - переміщення при проведенні експерименту на стійкість для ОПС - одиночний прямий стрижень (Зразок №3).

На рис. 3.6-3.9 показано налагодження і графіки деформування в часі стрижнів конструкції ППС - подвійний прямий стрижень. Розташовані поруч два стержня, не пов'язані між собою в активній частині.



Рис. 3.6. Налаштування і деформування в часі стрижня конструкції ППС

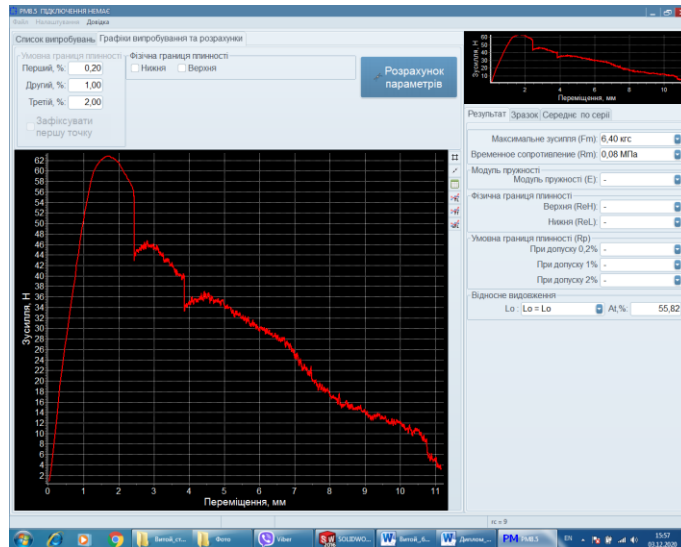


Рис. 3.7. Графік залежності сила - переміщення при проведенні експерименту на стійкість для ППС - подвійний прямий стрижень.

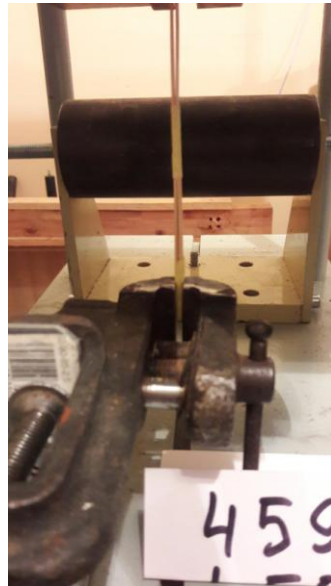


Рис. 3.8. Налаштування і деформування в часі стрижня конструкції ППС - подвійний прямий стрижень. Розташовані поруч два стержні, не пов'язані між собою в активній частині.

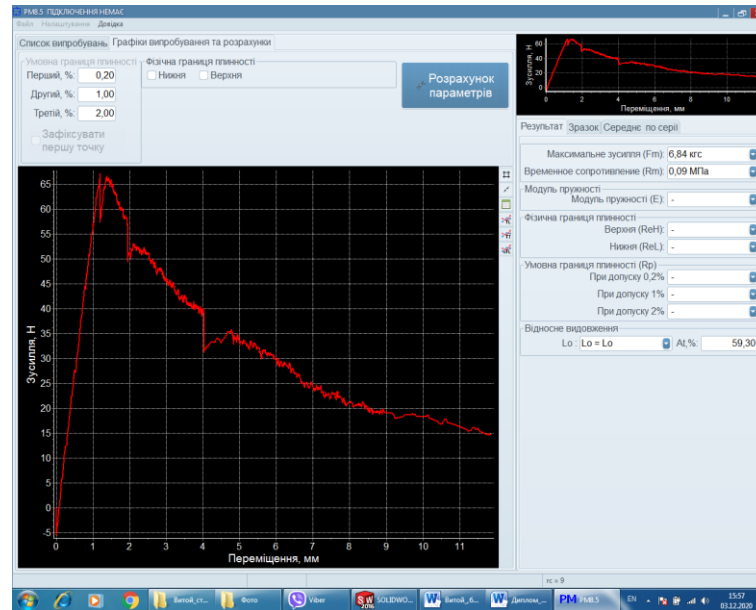


Рис. 3.9. Графік залежності сила - переміщення при проведенні експерименту на стійкість для ППС - подвійний прямий стрижень. Розташовані поруч два стрижня, не пов'язані між собою в активної частини.

На рис. 3.10-3.11 показано налагодження і графіки деформування в часі стрижнів конструкції ППКС - подвійний прямий клеєний стрижень. Розташовані поруч два стрижня, склеєних між собою в активної частини

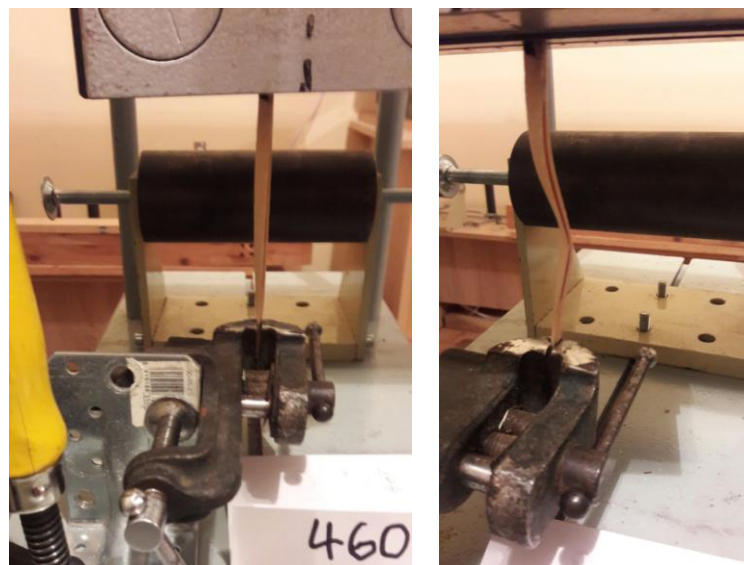


Рис. 3.10. Налаштування і деформування в часі стрижня конструкції ППКС - подвійний прямий клеєний стрижень. Розташовані поруч два стрижня, склеєних між собою в активної частини.

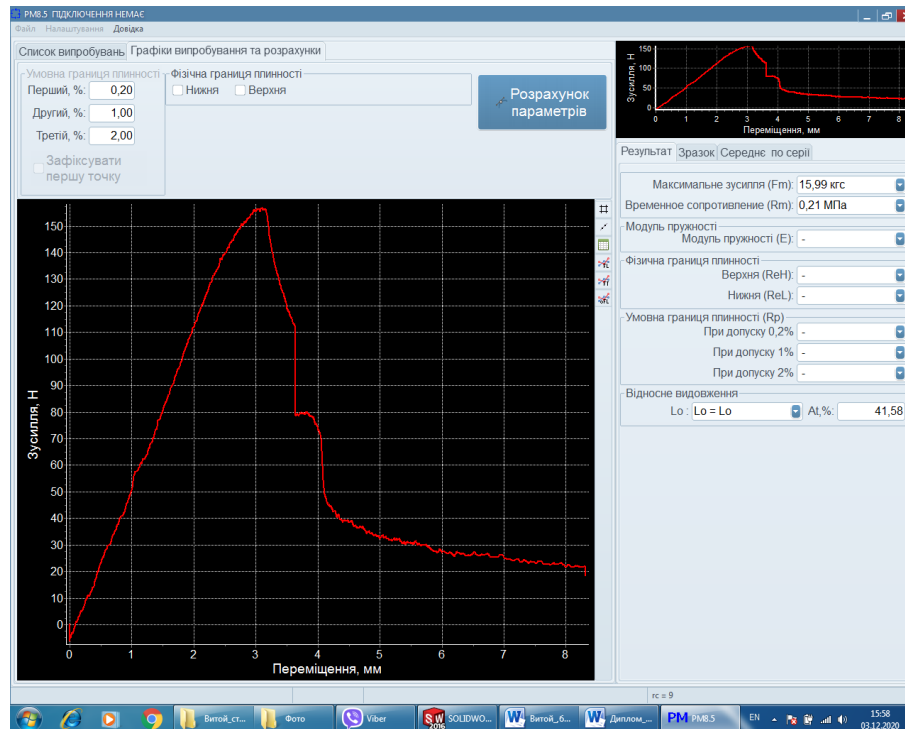


Рис. 3.11. Графік залежності сила - переміщення при проведенні експерименту на стійкість для ППКС - подвійний прямий клеєний стрижень. Розташовані поруч два стрижня, склеєних між собою в активної частини.

На рис. 3.12-3.19 показано налагодження і графіки деформування в часі стрижнів конструкції ППКС - подвійний кручений клеєний стрижень.



Рис. 3.12. Налаштування і деформування в часі стрижня конструкції ППКС- подвійний кручений клеєний стрижень.

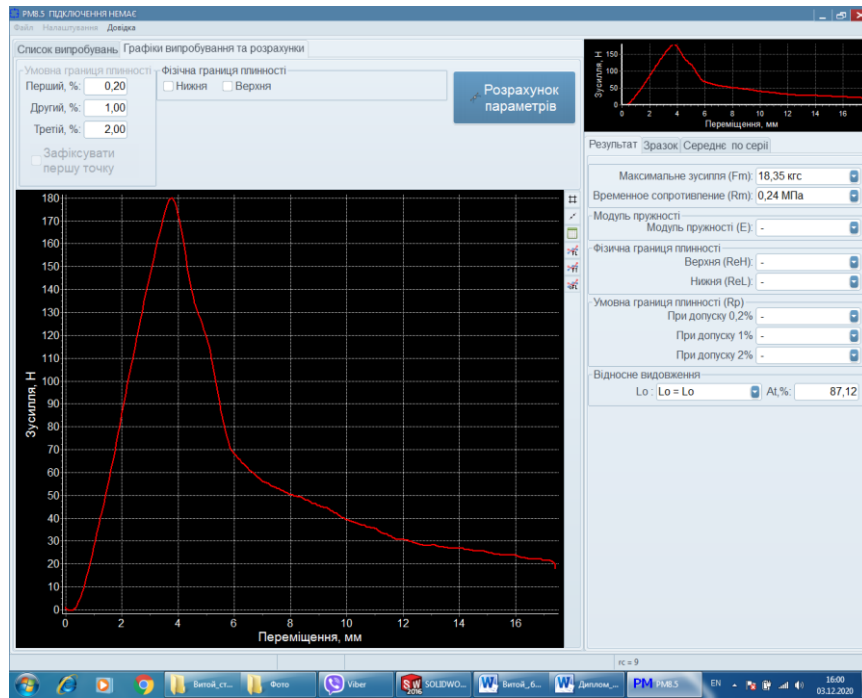


Рис. 3.13. Графік залежності сила - переміщення при проведенні експерименту на стійкість для ПККС - подвійний кручений клеєний стрижень.



Рис. 3.14. Налаштування і деформування в часі стрижня конструкції ПККС-подвійний кручений клеєний стрижень.

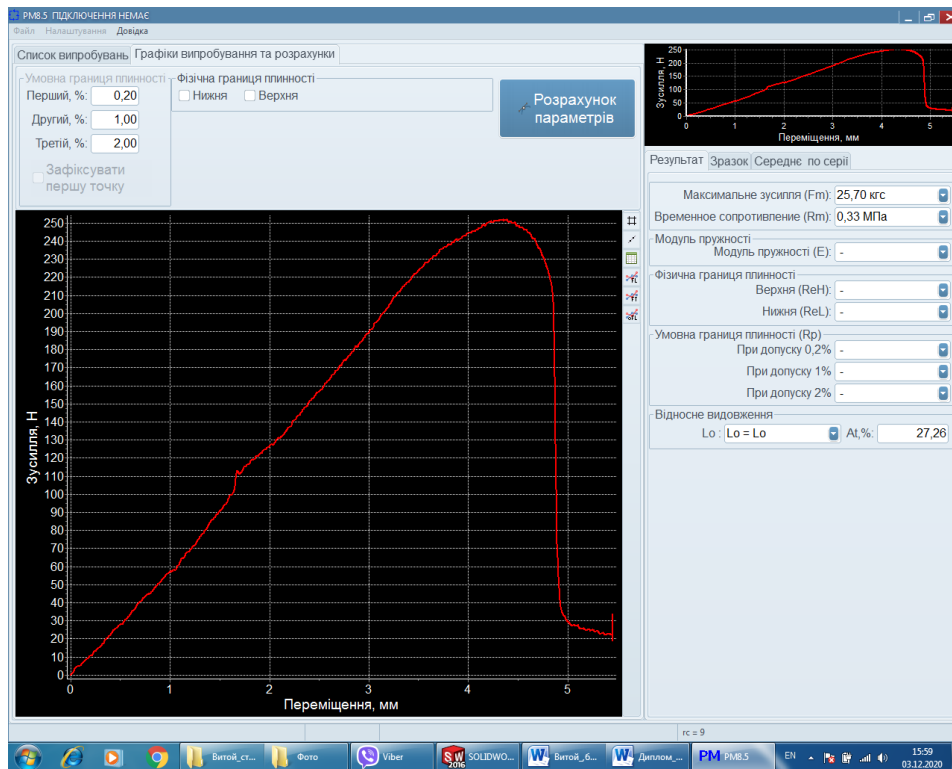


Рис. 3.15. Графік залежності сила - переміщення при проведенні експерименту на стійкість для ПККС - подвійний кручений клеєний стрижень.



Рис. 3.16. Налаштування і деформування в часі стрижня конструкції ПККС - подвійний кручений клеєний стрижень.

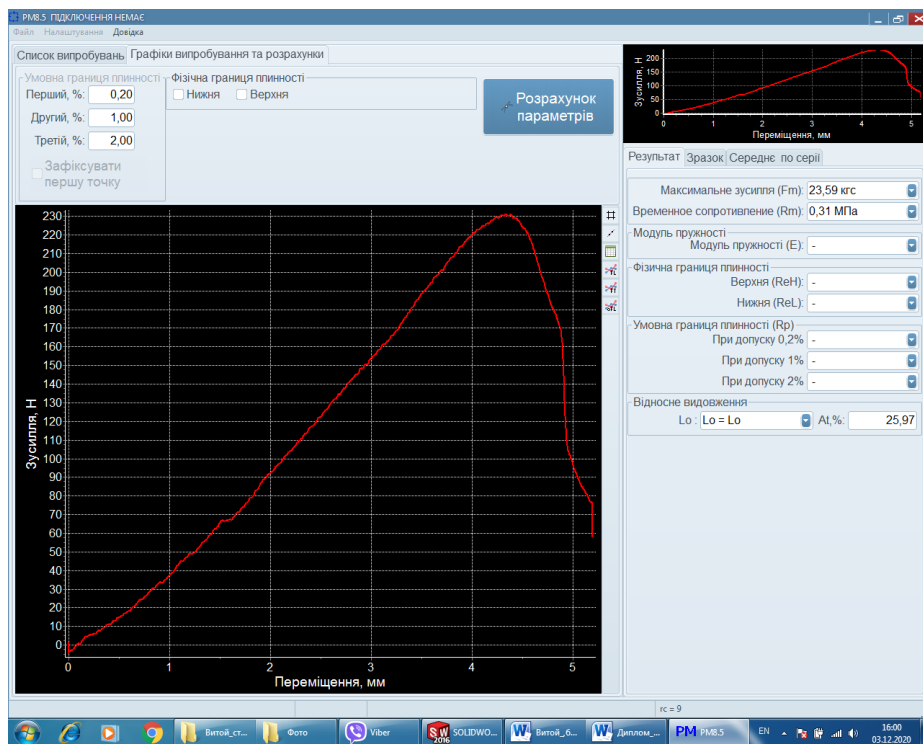


Рис. 3.17. Графік залежності сила - переміщення при проведенні експерименту на стійкість для ПККС - подвійний кручений клеєний стрижень.



Рис. 3.18. Налаштування і деформування в часі стрижня конструкції ПККС- подвійний кручений клеєний стрижень.

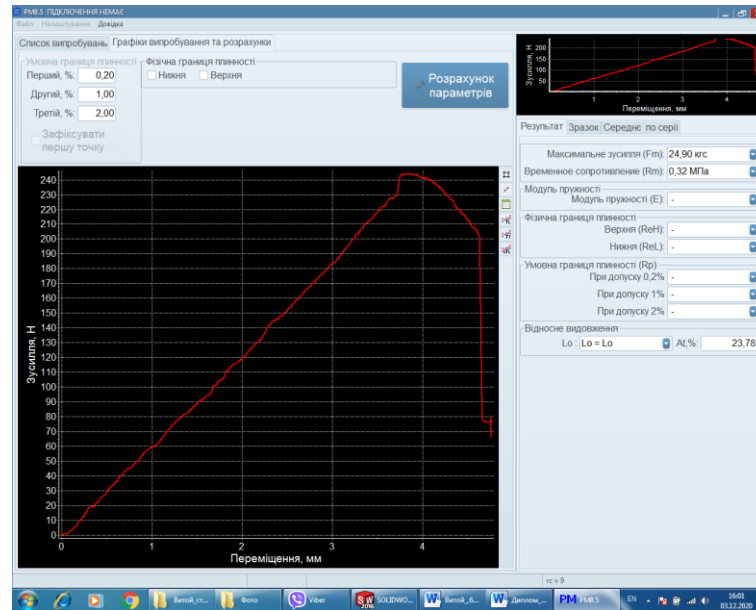


Рис. 3.19. Графік залежності сила - переміщення при проведенні експерименту на стійкість для ПККС- подвійний кручений клеєний стрижень.

Результати статистичної обробки даних, отриманих в результаті експерименту представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Результати статистичної обробки проведених експериментів

Показатель	ОПС	ППС	ППКС	ПККС
Кількість	6	6	6	6
Среднее	25,85	66,17	172,93	245,32
Станд откл	0,45	1,68	8,78	7,59
Минимум	25,40	64,00	159,90	235,90
Квартиль 1	25,60	65,13	167,60	240,68
Медиана	25,65	65,95	176,25	244,75
Квартиль 3	26,08	67,38	176,80	248,83
Максимум	26,60	68,40	183,50	257,00
Низ	25,60	65,13	167,60	240,68
2Q Коробка	0,05	0,83	8,65	4,07
3Q Коробка	0,43	1,43	0,55	4,07
Усы-	0,20	1,13	7,70	4,78
Усы+	0,53	1,03	6,70	8,18

На підставі даних показаних в табл. на рис. 36. показана графічна залежність максимального навантаження при втраті стійкості стрижнів в залежності від їх конструкцій.

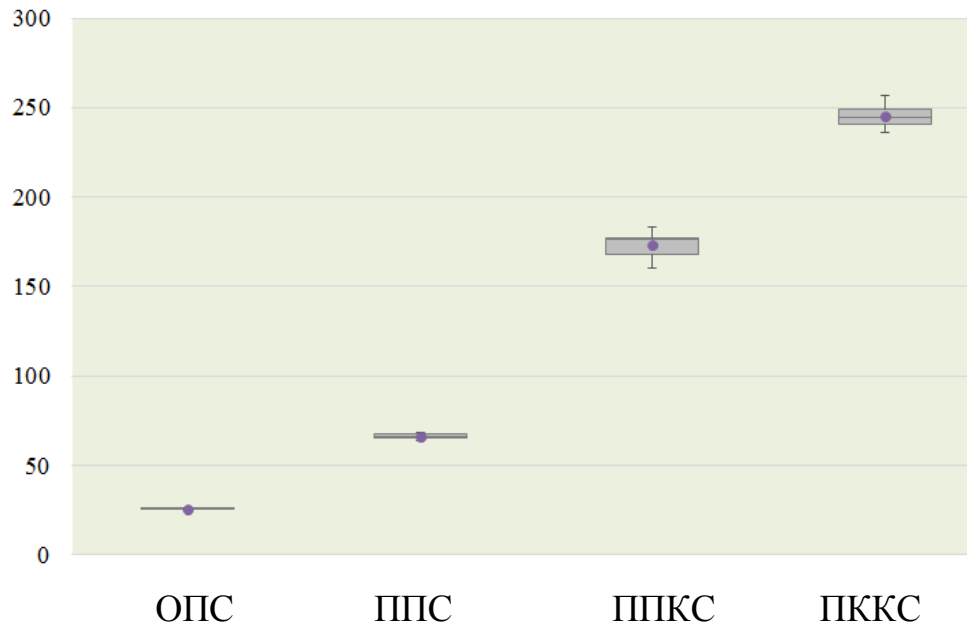


Рис. 36. Діаграма «ящик з вусами» для критичної сили Р (Н) в залежності від конструкції стрижня

На підставі результатів натурних експериментів можна стверджувати, що стійкість кручених стрижнів в порівнянні з прямими стрижнями таких же габаритів більше в середньому в

$$\varphi = 245,32 / 172,93 = 1,42 \text{ рази.}$$

Це дозволяє знизити вагу гратчастої конструкції на 40%.

Аналітичні розрахунки за формулою Ейлера показали збільшення згинальної жорсткості (стійкості) крученого стрижня в порівнянні з прямим в

$$\varphi = (6 / 2,4 / 2) 2 = 1,56 \text{ рази.}$$

Згідно проведеного обчислювального експерименту з застосування методу скінченних елементів розрахункове значення показника коефіцієнта підвищення ступеня стійкості склало

$$\varphi = 1,23 \text{ рази.}$$

Як бачимо, результати всіх експериментів незначно відрізняються один від одного, що говорить про їх достовірності.

Таким чином гратчасті конструкції виготовлені за пропонованим способом мають згинальну жорсткість більшу, ніж такі ж прямі на 40 ... 60% ..

Результати як обчислювальних, так і натурних експериментів свідчать про те, що, застосовуючі у гратчастих конструкціях кручені стрижні ми підвищуємо їх стійкість і згинальну жорсткість. Тим самим ми можемо зменшити матеріаломісткість конструкції і зменшити її вартість.

3.5. Висновки

На основі аналізу отриманих результатів симуляційного моделювання та експерименту *in situ* можна зробити такі висновки:

1. Застосування феномена моменту інерції плоских перерізів при проектуванні гратчастих конструкцій збільшує стійкість конструкції в середньому в 1,5 рази. Це дозволяє створювати гратчасті конструкції зниженої матеріаломісткості.
2. Зменшення ваги конструкції призводить до зменшення витрат матеріалу, і зменшення ціни. Це дозволяє говорити про появу товару ринкової новизни.
3. Для отримання більш точних значень збільшення коефіцієнта підвищення несучої здатності пропонованої конструкції провести додаткові експерименти на спеціальному програмно-апаратному комплексі лабораторії механічних випробувань кафедри експлуатації лісових ресурсів та деревообробних технологій Поліського національного університету.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Застосування феномена моменту інерції плоских перетинів при проектуванні гратчастих конструкцій дозволяє створювати конструкції підвищеної стійкості тобто зниженої матеріалоемності.
2. При цьому ефект підвищення стійкості, при проектуванні гратчастих конструкцій збільшує стійкість конструкції в середньому в 1,5 рази. Це дозволяє створювати гратчасті конструкції зниженої матеріалоемності.
3. Зменшення ваги конструкції призводить до зменшення витрат матеріалу, і зменшення ціни. Це дозволяє говорити про появу товару ринкової новизни.
4. Для отримання більш точних значень збільшення коефіцієнта підвищення несучої здатності пропонованої конструкції стрижнів необхідно провести додаткові експерименти для різних видів стрижнів та різних матеріалів на спеціальному програмно-апаратному комплексі лабораторії механічних випробувань кафедри експлуатації лісових ресурсів та деревообробних технологій Поліського національного університету.

Перелік використаних джерел

1. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.
2. Патент Англии №1235663, кл. Е 1 К, опубл. 1971 г.
3. А.С. №727792, М.кл. Е 04 С 3/08, Бюллетень №14 от 15.04.80 г.
4. А.С. №844720, М.кл. Е 04 С 3/08, Бюллетень №25 от 17.07.81 г.
5. Патент України № 130313, МПК Е04С 3/04 (2006.01), Бюллетень № 23 от 10.12.2018 г.
6. Гратчаста конструкція : пат. 119413 Україна : МПК Е04С 3/02, Е04С 3/04, Е04С 3/08. № а 2018 03608 ; заявл. 04.04.2018 ; опубл. 10.06.2019, Бюл. № 11.

7. Рокітенець О. В. Гратчасті конструкції в дерев'яних домобудівлях. Проблеми ведення та експлуатації лісових і мисливських ресурсів: матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції присвяченої пам'яті професора А.І. Гузія. (Житомир, 25 вересня 2020 р.). Житомир, 2020, с. 172.
8. Рокітенець О. В., Кульман С. М. Исследование концепции устойчивого эко-дизайна при производстве деревянных решетчатых конструкций. III Всеукраїнська науково-практична конференція Сучасні екологічні проблеми урбанізованих територій. (Житомир, 10-11 листопада 2020 р.). Житомир, 2020, с. 61-62.
9. Кульман С. М., Рокітенець О. В. Применение концепции устойчивого эко-дизайна при проектировании изделий из древесины. Тези Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених «Сталий розвиток країни в рамках Європейської інтеграції», 12 листопада 2020 року. – Житомир: «Житомирська політехніка», 2020. – с. 44.