

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»



ШЕХОРКІНА СВІТЛАНА ЄВГЕНІЇВНА

УДК 624.04:624.016

**НАУКОВІ ОСНОВИ І МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ГІБРИДНИХ
ДЕРЕВОЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ**

05.23.01 - будівельні конструкції, будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Савицький Микола Васильович,
Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», ректор,
професор кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Бліхарський Зіновій Ярославович**, Інститут будівництва та інженерних систем Національного університету «Львівська політехніка», директор;

доктор технічних наук, професор **Шмуклер Валерій Самуїлович**, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, завідувач кафедри будівельних конструкцій;

доктор технічних наук, доцент **Михайловський Денис Віталійович**, Київський національний університет будівництва і архітектури, професор кафедри металевих і дерев'яних конструкцій.

Захист відбудеться «7» травня 2021 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.085.02 при Державному вищому навчальному закладі «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» за адресою: 49005, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24а, ауд. 202.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» за адресою: 49005, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24а, та на сайті академії <https://pgasa.dp.ua/dissertation/>.

Автореферат розіслано «2» квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д.т.н., професор



Слободянюк С. О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Сутність науково-прикладної проблеми, яка розглядається в роботі, полягає в дослідженні та розробці наукових та методологічних положень, методів розрахунку та проектування гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель з урахуванням діаграм деформування, повзучості матеріалів та показників екологічного впливу на навколишнє середовище протягом життєвого циклу.

Вирішення цієї проблеми виконується шляхом розробки та обґрунтування ресурсоефективних конструктивних рішень, які відповідають критеріям стійкого розвитку та циркулярної економіки, проведення аналітичних та чисельно-експериментальних досліджень напружено-деформованого стану елементів та вузлів з урахуванням закономірностей деформування та повзучості матеріалів, розробку методів та оцінку параметрів екологічного впливу на всіх стадіях життєвого циклу.

Значення вирішення даної проблеми для народного господарства полягає в розвитку та створенні конкурентоздатних конструктивних рішень, які забезпечують трансфер інновацій в практику вітчизняного будівництва при одночасній мінімізації впливу будівельної галузі на навколишнє середовище та використання невідновлюваних матеріальних ресурсів.

Можливість розробки та реалізації багатоповерхових будівель з переважним використанням несучих елементів з деревини як природного відновлюваного ресурсу за рахунок застосування гібридної конструктивної системи, в якій ефективно поєднуються позитивні характеристики різних матеріалів є *основною науковою гіпотезою*.

Практичним результатом вирішення розглянутої проблеми є розробка конструктивних рішень гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель, які забезпечують відповідність критеріям несучої здатності та експлуатаційної придатності при раціональному використанні властивостей матеріалів та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище.

Актуальність теми. Традиційна будівельна галузь характеризується значним негативним впливом на глобальні екологічні проблеми на всіх етапах життєвого циклу будівельного об'єкта (від видобування сировини до утилізації) та поза його межами через необхідність захоронення відходів, не придатних до переробки та повторного використання. До характерних екологічних впливів будівництва можна віднести утворення шкідливих викидів та відходів, значний вуглецевий слід та споживання енергетичних ресурсів.

Стандарти стійкого розвитку та циркулярної економіки передбачають перехід до ресурсоефективних еко-орієнтованих конструктивно-технологічних рішень в усіх галузях людської діяльності за рахунок використання відновлюваних природних ресурсів, створення продукції, придатної до переробки з метою повторного використання, застосування матеріалів, що характеризуються мінімальною кількістю шкідливих викидів. Будівельним матеріалом, який сьогодні повністю відповідає вищенаведеним критеріям, є деревина.

Властивості деревини сприяли появі розробок гібридних багатоповерхових будівель, в яких переважна частина конструктивних елементів виконана з клеєної деревини, а просторова стабільність забезпечується діафрагмами або ядрами

жорсткості із залізобетону. Не дивлячись на те, що ряд проектів вже реалізовано в країнах Європейського Союзу та Канаді, дослідження, присвячені питанням спільної роботи несучих конструкцій з деревини та залізобетону в просторовій системі багатоповерхової будівлі, нечисленні, а комплексної нормативно-технічної документації щодо вибору конструктивних рішень для гібридних багатоповерхових деревозалізобетонних будівель на даний момент не існує.

З переходом національної будівельної галузі на норми, гармонізовані з європейськими, виникають проблеми щодо їх впровадження у практику проектування, які пов'язані з недотриманням вітчизняними виробниками вимог до сортування за якістю та міцністю, недостатнім обсягом даних щодо фізико-механічних властивостей інженерних виробів з деревини, що виготовляються на території України. Для можливості реалізації багатоповерхових будівель з дерев'яними конструкціями каркасу необхідна розробка та обґрунтування конструктивних рішень, що враховують специфіку вітчизняної виробничої бази, а також методів та рекомендацій щодо їх розрахунку для забезпечення міцності, стійкості та просторової незмінності.

Не дивлячись на загальносвітове усвідомлення глобальних екологічних проблем та розробку заходів з їх подолання в будівельній галузі, Україна знаходиться лише на початку цього шляху. Наразі бракує конкретної структури цільового проектування, яка пов'язує всі існуючі та нові проектні підходи в одне ціле з урахуванням стійкого циркулярного характеру функціональності будівлі. Необхідна розробка загальної методики оцінки вуглецевого сліду будівель протягом життєвого циклу, що включає проектування, зведення, експлуатацію, технічне обслуговування та рециклінг, з використанням вимог та процедур приведених у стандартах, які використовуються в країнах Європейського Союзу.

Виходячи з вищенаведеного, розробка наукових основ та методів розрахунку гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель з урахуванням діаграм деформування, повзучості матеріалів та показників екологічного впливу на навколишнє середовище протягом життєвого циклу є актуальною науково-прикладною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до: Плану дій Європейського Союзу щодо циркулярної економіки від 2 грудня 2015 р., Указу Президента України №722/2019 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року», Розпорядження Кабінету Міністрів України від 7 грудня 2016 р. № 932-р «Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року», а також у відповідності до науково-дослідних робіт на замовлення Міністерства освіти і науки України (МОН України) «Високоефективні конструкції малоповерхових будівель для будівництва доступного соціального житла» (№ держреєстрації (ДР) 0109U001396, 2009-2010 рр.), «Створення методології раціонального проектування ресурсозберігаючих архітектурно-конструктивно-технологічних систем для будівництва доступного житла» (№ДР 0111U000455, 2011-2012 рр.), «Розробка наукових засад створення високотехнологічних соціоекокомплексів в Україні на основі концепції стійкого розвитку» (№ ДР 0113U00129, 2013-2014 рр.), «Розробка наукових засад трансформації будівель та житлових комплексів сучасних великих

міст України на основі інноваційних екотехнологій» (№ ДР 0115U000218, 2015 – 2016 рр.), «Наукові основи створення будівельно-аграрних кластерів із замкнутим циклом матеріальних та енергетичних потоків» (№ ДР 0117U000367, 2017 – 2018 рр.), «Розробка наукових основ інноваційної архітектурно-конструктивно-технологічної системи будівництва методом 3D-друку» (№ ДР 0119U100608, 2019-2020 рр.) у яких здобувач брав участь як відповідальний виконавець. В науково-технічній розробці молодих вчених на замовлення МОН України «Науково-практичні засади проектування автономних екобудівель за концепцією «Потрійний Нуль» (№ ДР 0117U006728, 2017-2020 рр.), а також міжнародному науково-освітньому проєкті за фінансування Вишеградського фонду (Visegrad Fund) «InStep Project. International Sustainable Engineering Practices» та Європейської комісії Horizon 2020 «PRECEPT. A novel decentralized edge-enabled PREsCriptivE and ProacTive framework for increased energy efficiency and well-being in residential buildings» здобувач брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка наукових основ та методів розрахунку гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель з урахуванням діаграм деформування, повзучості матеріалів та показників екологічного впливу на навколишнє середовище протягом життєвого циклу.

Для досягнення мети поставлені та вирішені такі **завдання дослідження**:

1. Аналіз існуючого досвіду будівництва багатоповерхових будівель гібридної системи з дерев'яними та залізобетонними конструкціями.

2. Удосконалення конструктивних рішень елементів та вузлів гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель.

3. Розробка загальних підходів, положень та принципів проектування гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель з урахуванням діаграм деформування та повзучості матеріалів.

4. Експериментальні дослідження матеріалів та виробів з деревини, великорозмірних дерев'яних конструкцій та вузлових з'єднань для гібридних конструкцій.

5. Аналітичні та чисельно-експериментальні дослідження напружено-деформованого стану (НДС) елементів та вузлів гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель з урахуванням реологічних властивостей матеріалів.

6. Розробка методу оцінки та дослідження вуглецевого сліду гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель протягом життєвого циклу.

Об'єкт дослідження – формування гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель.

Предмет дослідження – закономірності напружено-деформованого стану несучих конструкцій, вузлів та показники екологічного впливу гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель.

Методи дослідження: методи моделювання напружено-деформованого стану конструкцій на основі методу скінчених елементів; теоретично-аналітичні методи будівельної механіки; методи раціонального проектування; методи експериментальних досліджень в лабораторних умовах; загальні методи емпіричних і теоретичних досліджень: аналіз, абстрагування, індукція, дедукція, синтез.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в створенні науково-

методологічних основ розрахунку та проектування гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель з урахуванням діаграм деформування, повзучості матеріалів та показників екологічного впливу на навколишнє середовище протягом життєвого циклу, а саме:

вперше:

– запропоновано загальний методологічний підхід, основні положення та принципи розрахунку гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель з урахуванням діаграм деформування, повзучості матеріалів та показників екологічного впливу на навколишнє середовище протягом життєвого циклу;

– встановлені закономірності зміни параметрів НДС конструкцій гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель в залежності від конструктивної схеми;

– обґрунтовано вибір конструктивної схеми та спосіб забезпечення просторової жорсткості гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель висотою до 20-ти поверхів включно;

– запропоновано метод оцінки та компенсації нерівномірних вертикальних переміщень несучих конструкцій гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель;

– розроблені нові конструктивні рішення основних вузлів з'єднань несучих конструкцій гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель, а саме стик колон по висоті, з'єднання балки та колони;

– запропоновано чисельно-аналітичний метод оцінки НДС згинальних деревозалізобетонних конструкцій з урахуванням діаграм деформування матеріалів і з'єднань та ступеня спільної роботи елементів конструкції;

удосконалено:

– конструктивні рішення гібридного деревозалізобетонного ребристого перекриття, вузлів сполучення колон з фундаментом, балок та залізобетонних конструкцій, з'єднання вертикальних в'язей з колонами та балками гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель;

– метод розрахунку багатоповерхових будівель в частині гібридних деревозалізобетонних конструктивних систем;

– метод експериментального дослідження міцності та деформативності деревини в зоні взаємодії з металевим нагелем шляхом поєднання стандартних методик з методами оптичної фізики (лазерної голографічної інтерферометрії);

– метод моделювання НДС з'єднань на металевих зв'язках нагельного типу шляхом розбиття масиву деревини на дві області – глобальну з нормованими значеннями фізико-механічних властивостей деревини та локальну в зоні вдавнення з приведеними характеристиками;

отримало подальший розвиток:

– метод оцінки вертикальних переміщень несучих конструкцій гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель, який враховує діаграми деформування, а також характеристики повзучості деревини та бетону;

– експериментальні дані щодо фізико-механічних характеристик клеєної деревини, що виготовляється з деревини сосни місцевого походження, натурних

клеєдерев'яних балок, болтових з'єднань клеєної деревини на металевих пластинах та з'єднань дерев'яних елементів на металевих зубчастих пластинах;

– методологія оцінки впливу будівельного об'єкту на навколишнє середовище шляхом аналізу вуглецевого сліду, що враховує всі стадії життєвого циклу, а також можливість рециклінгу складових елементів та матеріалів після ліквідації будівлі.

Практичне значення отриманих результатів:

– створено методологічні основи для розроблення проектів гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель та їх реалізації у вітчизняній практиці будівництва;

– розроблено та впроваджено рекомендації щодо розрахунку гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель з урахуванням діаграм деформування та повзучості матеріалів;

– розроблено алгоритм розрахунку гібридних деревозалізобетонних згинальних конструкцій з урахуванням діаграми деформування з'єднання і арматури в розтягнутій зоні бетонного елемента;

– впроваджено методику та результати експериментальних досліджень міцності та деформативності дерев'яних конструкцій та з'єднань із застосуванням лазерної голографічної інтерферометрії;

– запропоновано методику розрахунку вузла сполучення дерев'яної балки та колони гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель;

– запропоновано методику визначення вуглецевого сліду будівлі з урахуванням вимог європейського стандарту EN 15978;

– результати досліджень впроваджено в нормативно-технічний документ Міністерства регіонального розвитку та будівництва України (ДСТУ-Н Б EN 1995-1-1:2010 «Єврокод 5. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1995-1-1:2004, IDT)». Зміна №1);

– результати досліджень частково використані при підготовці навчального посібника «Проектування дерев'яних конструкцій за Єврокодами та національними додатками України» / М.В. Савицький, В.В. Стоянов, С.Є. Шехоркіна та ін. Дніпро : ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», ТОВ «Роял Принт», 2017. 147 с., а також використовуються в навчальному процесі Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» при підготовці здобувачів вищої освіти за напрямком 192 – Будівництво та цивільна інженерія, спеціальність «Промислове та цивільне будівництво» при викладанні спеціальних курсів «Зелене будівництво» та «Сучасні архітектурно-конструктивні рішення будівель і споруд».

Обґрунтованість і достовірність отриманих наукових результатів забезпечується:

– використанням фундаментальних положень теорії опору матеріалів; закономірностей будівельної механіки; сучасних методів оцінки екологічних показників;

– виконаними експериментальними дослідженнями та збіжністю результатів аналітичних і експериментальних досліджень;

– використанням в дослідженнях загальноприйнятих теоретичних положень та методів проведення наукових досліджень, використанням сертифікованих вимірjuвальних приладів та обладнання, сучасної обчислювальної техніки та програмного забезпечення;

– впровадженням отриманих результатів у практику будівництва, а також апробацією отриманих результатів роботи.

Особистий внесок здобувача. Всі викладені в дисертаційній роботі ідеї, наукові розробки, положення, аналітичні залежності та чисельні моделі, експериментальні дослідження і практичні результати отримані автором особисто. Особистий внесок здобувача в наукових працях, опублікованих у співавторстві полягає в такому: проведено аналіз та систематизацію існуючих конструктивних рішень багатопверхових будівель з дерев'яними конструкціями в контексті зниження шкідливих викидів, а також вимог до розрахунку конструкцій, встановлення фізико-механічних властивостей конструкційної деревини, відповідно до національних та європейських стандартів [1, 2, 22-26, 29]; проведено чисельне моделювання НДС гібридних деревозалізобетонних багатопверхових будівель з урахуванням діаграм деформування та реологічних властивостей матеріалів, запропоновано спрощену методику оцінки вертикальних переміщень та сформульовано метод та алгоритм компенсації нерівномірних вертикальних переміщень [5, 9, 10, 12, 33]; удосконалено конструктивне рішення та метод розрахунку гібридного дерево залізобетонного перекриття з урахуванням нелінійної роботи з'єднання [4, 14, 19]; розроблено методику та програму дослідження та отримано експериментальні дані щодо фізико-механічних та деформаційних характеристик клеєної деревини, натурних балок, нагельних з'єднань та з'єднань на металевих пластинах [6-8]; розроблено методику та програму експериментальних досліджень дерев'яних елементів із застосуванням методу голографічної інтерферометрії [3, 16]; запропоновано конструктивні рішення, виконано теоретичне та експериментальне обґрунтування екологічних несучих конструкцій [21, 27, 28, 30, 31]; розроблено методику та виконано аналіз результатів скінченноелементного моделювання багатоболтового з'єднання на сталевих пластинах [18]; розроблено конструктивні рішення та сформульовано критерії забезпечення несучої здатності вузлів з'єднань [11, 17, 32]; запропоновано загальну методику, отримано аналітичні залежності та виконано оцінку шкідливих викидів (вуглекислого газу) протягом життєвого циклу гібридної багатопверхової будівлі [13, 15, 20, 34, 35].

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на міжнародних і вітчизняних науково-технічних конференціях і семінарах: 6-та міжнародна науково-практична конференція «Створення високотехнологічних соціоекокомплексів в Україні на основі концепції збалансованого (стійкого) розвитку», Львів, 2017 р.; Міжнародна науково-практична конференція «Sustainable housing and human settlement», Братислава (Словаччина), 2018 р.; XVI міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні технології життєвого циклу об'єктів житлово-цивільного, промислового і транспортного призначення», Львів, 2018 р.; 14-та Міжнародна конференція enviBUILD 2019, Братислава (Словаччина), 2019 р.; Всеукраїнська 79-та науково-практична конференція студентів та молодих вчених «Проблеми будівництва,

водокористування та екології», Дніпро, 2019 р.; VII міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми інженерної механіки», Одеса, 2020 р.; 6-й міжнародний конгрес «Сталий розвиток: Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», Львів, 2020 р.; 18th International Scientific and Practical Conference «Innovative Technologies in Construction, Civil Engineering and Architecture», Дніпро, 2020.

Публікації. Основні положення, результати та висновки дисертаційної роботи відображені в 35 наукових працях, у тому числі 15 статтях у наукових фахових виданнях України, 4 статтях у наукових виданнях інших держав та фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз SCOPUS та Web of Science, 2 колективних монографіях, 10 публікаціях, які додатково відображають наукові результати дисертації (1 державному стандарті України, 8 колективних монографіях, 1 статті у науковому фаховому виданні України) та 4 публікаціях, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 329 найменувань, чотирьох додатків. Повний обсяг дисертації становить 383 сторінки, а обсяг основного тексту – 272 сторінки. Список використаних джерел викладено на 38 сторінках. Додатки представлено на 38 сторінках. Робота містить 127 рисунків та 73 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету та задачі досліджень; визначено об'єкт та предмет, наукову новизну і практичне значення роботи; зазначено особистий внесок здобувача та розглянуто методи досліджень і відомості про публікації й апробацію результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** наведено літературний огляд та критичний аналіз сучасних тенденцій та перспектив багатоповерхового будівництва з використанням дерев'яних конструкцій в контексті стійкого розвитку та циркулярної економіки. Розглянуто існуючі рішення гібридних конструктивних систем, сучасні інженерні виробы, гібридні конструкції з використанням деревини, методи експериментального дослідження, розрахунку та особливості роботи. Виконано аналіз методів оцінки життєвого циклу будівельних об'єктів.

Розробці та удосконаленню методів розрахунку багатоповерхових будівель та їх конструктивних елементів з урахування діаграм деформування та реологічних властивостей присвячені роботи вітчизняних вчених Алмазова В. О., Бамбури А. М., Барашикова А. Я., Барабаш М. С., Бліхарського З. Я., Городецького О. С., Єгорова Є. А., Кулябка В. В., Лантух-Ляценка А. І., Пічугіна С. Ф., Перельмутера А. В., Слободянюка С. О., Шмуклера В. С. та багатьох інших вчених.

Питанням вивчення властивостей деревини та розробки методів розрахунку дерев'яних конструкцій присвячена велика кількість публікацій як вітчизняних, так і закордонних авторів. Серед них слід відзначити роботи Ашкеназі Є. К., Іванова В. О., Кліменка В. З., Фурсова В. В., Стоянова В. В., Гомона С. С., Найчука А. Я., Калугіна А. В., Журавльова О. О., Вержбовського Г. Б., Єременка М. М., Михайловського Д. В., Vodig J., Hiramatsu Y., Sousa H. S., Sandhaas C., Steiger R. та ін.

Щодо проектування гібридних систем, то розробки вітчизняних вчених здебільшого були присвячені сталезалізобетонним конструкціям, зокрема роботи Бібіка Д. В., Воскобійник О. П., Гасія Г. М., Єрмоленка Д. А., Ізбаша М. Ю., Нижника О. В., Семка О. В., Стороженка Л. І., Фабрики Ю. М. та ін.

Проведений аналіз публікацій показав, що даних щодо розробки та обґрунтування несучих дерев'яних або деревозалізобетонних конструкцій багатоповерхових будівель на сьогоднішній день вкрай недостатньо. Серед таких робіт слід відзначити дослідження НДС будівлі з панелей із поперечно-клеєної деревини Михайловського Д. В., а також незначну кількість публікацій закордонних авторів, серед яких роботи Malo K. A., Abrahamsen R. B., Vjertnæs M. A., Tannert T., Moudgil M., Green M. Розробці методів розрахунку гібридних деревозалізобетонних перекриттів присвячені роботи вчених Абдрахманова І. С., Мельникова Ю. О., Ратнера В. І., а також роботи закордонних вчених Auclair S. C., Dias A. M. P. G., Girhammar U. A., Khorsandnia N., Mascia N. T., Gelfi P., Van de Kuilen J. W. та ін.

Дослідженням, спрямованим на розробку архітектурно-конструктивно-технологічних рішень будівель, що відповідають критеріям ресурсоефективності, стійкого розвитку, а також методів оцінки життєвого циклу, присвячені роботи Савицького М. В., Бабенко М. М., Коваль О. О., Нікіфорової Т. Д., Перегінця І. І., Юрченко Є. Л., De Wolf C., Eberhardt L. C. M., Moncaster A., Resch E. та ін.

На основі проведеного аналізу робіт і стану досліджень зроблені наступні висновки:

1. Гібридні конструкції, завдяки раціональному поєднанню властивостей, дозволяють збільшити несучу здатність та просторову жорсткість будівлі, що дозволяє використовувати деревину як основний конструкційний матеріал в багатоповерхових будівлях. Застосування деревини в багатоповерховому будівництві є перспективним напрямком з точки зору зменшення негативного впливу будівельної галузі на навколишнє середовище.

2. На сьогоднішній день відсутні рекомендації щодо вибору конструктивної системи багатоповерхових деревозалізобетонних гібридних будівель. Необхідна розробка конструктивних рішень елементів каркасу та перекриттів, а також вузлів з'єднань несучих конструкцій.

3. Питання спільної роботи несучих конструкцій з деревини та залізобетону в просторовій системі багатоповерхової будівлі досліджені недостатньо. Необхідне дослідження НДС гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель, обґрунтування конструктивної системи з точки зору забезпечення несучої здатності елементів, просторової жорсткості та рівномірного деформування вертикальних елементів.

4. Для проектування клеєних конструкцій, згідно чинних норм, слід використовувати розрахункові характеристики за класами міцності, відповідно до європейських стандартів, з яких не всі, на даний момент, є гармонізованими з національною нормативною базою. З огляду на це, на практиці виникають проблеми проектування клеєних дерев'яних конструкцій, які пов'язані з фактичною відсутністю рекомендацій щодо визначення фізико-механічних характеристик інженерних виробів з деревини, які виготовляються в Україні.

5. З метою раціонального проектування деревозалізобетонних конструкцій та

вузлів сполучень елементів багатоповерхових будівель необхідне проведення теоретико-експериментальних досліджень їх роботи під навантаженням, удосконалення методів проектування з урахуванням конструктивних особливостей та діаграм деформування з'єднувальних елементів, а також розробка рекомендацій з розрахунку.

6. В Україні наразі бракує інтегрованих стандартів з оцінки шкідливих викидів будівлі, які враховують циркулярний характер функціональності будівлі. Необхідна розробка загальної методики оцінки вуглецевого сліду будівель протягом життєвого циклу, що включає проектування, будівництво, експлуатацію, технічне обслуговування, переробку та рециклінг, з використанням вимог стандартів Європейського Союзу.

У **другому розділі** запропонована класифікація конструктивних систем гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель на основі характеру і способу розподілу несучих функцій між елементами та матеріалу вертикальних несучих конструкцій. Конструктивні системи розділені на три базові групи: стінову, каркасну та комбіновану, яка в свою чергу включає підтипи (каркасно-діафрагмову; каркасно-ствольну; каркасно-оболонкову) (рис. 1). Приведено конструктивні заходи щодо забезпечення просторової жорсткості.

Запропоновано конструктивні рішення збірно-монолітного та збірного деревозалізобетонного перекриття, які складаються з головних та другорядних балок, по верхній площині яких влаштовується плита із залізобетону або армованого ґрунтобетону. Таке рішення забезпечує створення протипожежних відсіків в межах окремого поверху, можливість вільного планування приміщень та максимально можливе використання деревини з точки зору відповідності критеріям стійкого розвитку.

Розроблені конструктивні рішення характерних вузлів з'єднань несучих конструкцій гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель, а саме стик колон по висоті; вузол з'єднання балок та колон; стик колон з фундаментом; сполучення балок та залізобетонних діафрагм або ядра жорсткості; з'єднання вертикальних в'язей з колонами та балками. Запропоновані рішення полегшують виконання монтажних робіт, підвищують геометричну точність з'єднання елементів та забезпечують вогнестійкість з'єднання, оскільки металеві елементи, які мають низький опір впливу високих температур, приховані в тілі несучих конструкцій.

Сформульовані вимоги щодо забезпечення відповідності елементів каркасу критеріям несучої здатності та експлуатаційної придатності з урахуванням вимог пожежної безпеки. Отримані дані щодо мінімально допустимих розмірів поперечних перерізів колон та балок каркасу багатоповерхових гібридних будівель з урахуванням критеріїв вогнестійкості.

Порівняно із розрахунком без врахування критерію забезпечення класу вогнестійкості, для дотримання вимог пожежної безпеки необхідне збільшення розмірів поперечного перерізу колон в 1.4-1.7 разів для класу R120 та в 1.5-1.9 разів для класу R150. Застосування захисної обшивки дозволяє зменшити розміри сторін поперечного перерізу колони на 30-40 мм. Для дотримання вимог по вогнестійкості без застосування захисної обшивки необхідне збільшення ширини поперечного перерізу балок в 1.4-1.8 разів для класу R45 та в 1.5-2 разів для класу R60.

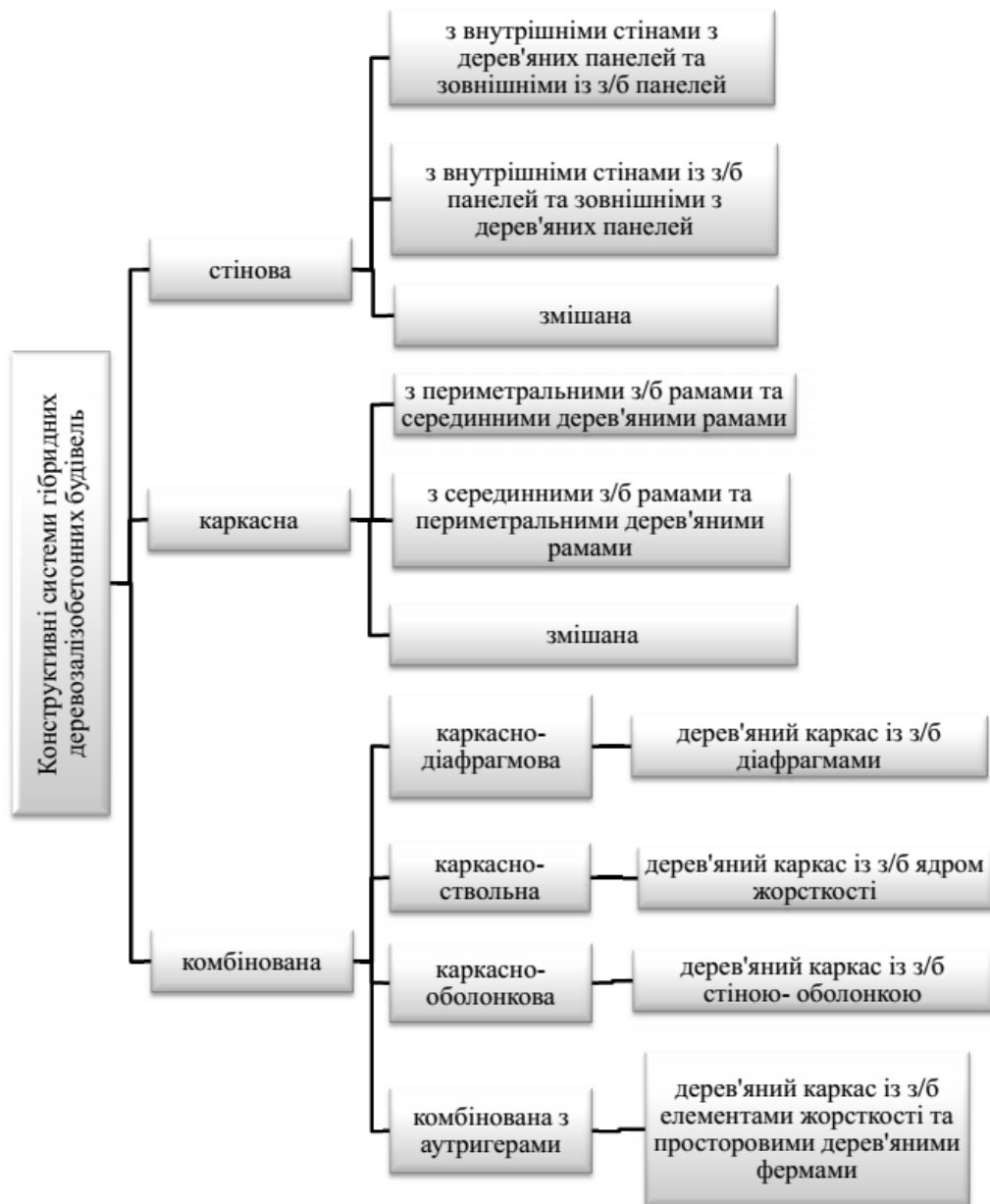


Рисунок 1 – Класифікація конструктивних систем гібридних деревозалізобетонних багатопверхових будівель

Третій розділ присвячено обґрунтуванню конструктивних схем гібридних деревозалізобетонних багатопверхових будівель.

Виконано оцінку НДС елементів гібридних деревозалізобетонних багатопверхових будівель в залежності від типу конструктивної схеми, способу забезпечення просторової жорсткості, а також фізико-механічних характеристик, залежностей «напруження-деформація» та реологічних властивостей матеріалів. З цією метою були розглянуті наступні варіанти конструктивних схем: 1 – типова каркасна схема з дерев'яних колон та балок; 2 - комбінована з двома діафрагмами жорсткості; 3 - комбінована з чотирма діафрагмами жорсткості; 4 - комбінована з ядром жорсткості; 5 - комбінована з ядром і чотирма діафрагмами жорсткості; 6 - комбінована з ядром жорсткості і аутригером в рівні верхнього поверху; 7 - комбінована з ядром жорсткості і аутригером в двох рівнях (верхнього та середнього поверхів).

Для аналізу було прийнято квадратний в плані будинок-прототип. Крок колон в поздовжньому і поперечному напрямках становив 5 м. Загальний габарит будівлі в плані 25x25 м. При моделюванні варіювалася кількість поверхів (5, 10, 15 і 20). Висота поверху прийнята 3 м. В якості матеріалів несучих конструкцій були прийняті: для балок, колон та елементів аутригерів - клеєна деревина класу міцності GL28h; для діафрагм та ядра жорсткості - залізобетон класу міцності C20/25. На елементи розрахункових моделей задавалися навантаження відповідно до вимог чинних нормативних документів.

Для урахування діаграм деформування та повзучості матеріалів при моделюванні НДС багатоповерхових гібридних деревозалізобетонних систем були використані залежності «напруження-деформації» та моделі повзучості, отримані на основі загальновідомих положень.

Залежність «напруження-деформації» бетону для розрахунку залізобетонних конструкцій приведена в ДБН В.2.6-98:2009 і має вигляд:

$$\sigma_c = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} f_{cd} \text{ при } 0 < |\varepsilon_c| < |\varepsilon_{cul}|, \quad (1)$$

де $\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{cl}$; $k = 1.05 E_{cd} \varepsilon_{cl} / f_{cd}$; ε_{cl} – деформації при максимальних напруженнях; ε_{cul} – номінальні граничні деформації бетону; f_{cd} – розрахункова міцність бетону на стиск.

Для моделювання роботи деревини на розтяг було використано лінійну залежність:

$$\sigma_{t,t} = \begin{cases} E_0 \varepsilon & \text{при } \varepsilon_{t,tu} \leq f_{t,0,d} / E_0 \\ 0 & \text{при } \varepsilon_{t,tu} > f_{t,0,d} / E_0 \end{cases}, \quad (2)$$

де $\sigma_{t,t}$ – напруження при розтязі; E_0 – модуль пружності паралельно волокнам; $f_{t,0,d}$ – розрахункова міцність на розтяг паралельно волокнам; ε – деформація, $\varepsilon_{t,tu}$ – граничні деформації при розтягуванні.

Для моделювання роботи деревини на стиск використано дволінійну залежність, яка враховує залишкову міцність деревини після досягнення міцності на стиск:

$$\sigma_{c,t} = \begin{cases} E_0 \varepsilon & \text{при } \varepsilon_{t,c1} \leq f_{c,0,d} / E_0 \\ f_{c,0,d} - 0.1 E_0 \left(\varepsilon - \frac{E_0}{f_{c,0,d}} \right) & \text{при } \varepsilon_{t,c1} > f_{c,0,d} / E_0 \end{cases}, \quad (3)$$

де $\sigma_{c,t}$ – напруження при стиску; $f_{c,0,d}$ – розрахункова міцність на стиск паралельно волокнам, $\varepsilon_{t,c1}$ – граничні деформації при стиску.

Для врахування деформацій, спричинених повзучістю бетону, була використана модель, приведена в Eurocode EN 1992-1-1:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0), \quad (4)$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0), \quad (5)$$

$$\beta_c(t, t_0) = [(t - t_0) / \beta_H + (t - t_0)]^{0.3}, \quad (6)$$

де φ_0 – теоретичний коефіцієнт повзучості; $\beta_c(t, t_0)$ – коефіцієнт, що описує розвиток повзучості протягом часу; φ_{RH} – коефіцієнт, що враховує вплив відносної вологості; $\beta(f_{cm})$ – коефіцієнт, що враховує вплив міцності бетону на стиск на теоретичний коефіцієнт повзучості; $\beta(t_0)$ – коефіцієнт, що враховує вік бетону при навантаженні; β_H – коефіцієнт, що залежить від відносної вологості та умовного приведенного розміру елемента; t_0 – вік бетону в момент навантаження; t – вік бетону в поточний момент.

Повзучість деревини була врахована шляхом використання моделі повзучості пружно-в'язко-пластичного тіла Т. Toratti, що враховує в'язкопружні та механіко-сорбційні властивості деревини:

$$\varphi_t(t) = \varphi_{ic}(t) + \varphi_{ims}(t), \quad (7)$$

де $\varphi_{ic}(t)$ – коефіцієнт в'язко-пружної повзучості; $\varphi_{ims}(t)$ – коефіцієнт механіко-сорбційної повзучості.

Коефіцієнт в'язкопружної повзучості:

$$\varphi_{ic}(t) = at^b, \quad (8)$$

де t – час, дні; a, b – емпіричні коефіцієнти, що залежать від виду деревини.

Коефіцієнт механіко-сорбційної повзучості:

$$\varphi_{ims}(t) = \varphi_{ims,r}(t) + \varphi_{ims,i}(t), \quad (9)$$

де $\varphi_{ims,r}(t)$ – коефіцієнт механіко-сорбційної повзучості, що викликає оборотні деформації; $\varphi_{ims,i}(t)$ – коефіцієнт механіко-сорбційної повзучості, що викликає необоротні деформації.

Коефіцієнт механіко-сорбційної повзучості, що викликає оборотні деформації:

$$\varphi_{ims,r}(t) = \varphi^\infty \left(1 - e^{-c \frac{U \cdot t}{100 \Delta t}} \right), \quad (10)$$

де U – накопичення вологи деревиною протягом періоду часу Δt з урахуванням коливань відносної вологості середовища; Δt – проміжок часу, за який визначається накопичення коливань вологості деревини ($\Delta t = 365$ днів); φ^∞, c – емпіричні коефіцієнти, що залежать від виду деревини.

Коефіцієнт механіко-сорбційної повзучості, що викликає необоротні деформації:

$$\varphi_{ms,i}(t) = m_{ms}(\Delta\hat{U}), \quad (11)$$

де $\Delta\hat{U}$ - максимальний вміст вологи за період з моменту навантаження; m_{ms} - емпіричний коефіцієнт, що залежить від виду деревини.

В результаті статичного розрахунку просторових моделей були отримані дані про величину горизонтальних переміщень верхньої частини, тобто відхилення будівлі від вертикальної осі, а також максимальні значення зусиль від несприятливих сполучень навантажень. Отримані результати проілюстровані на прикладі для 20-ти поверхового будинку на рис. 2.

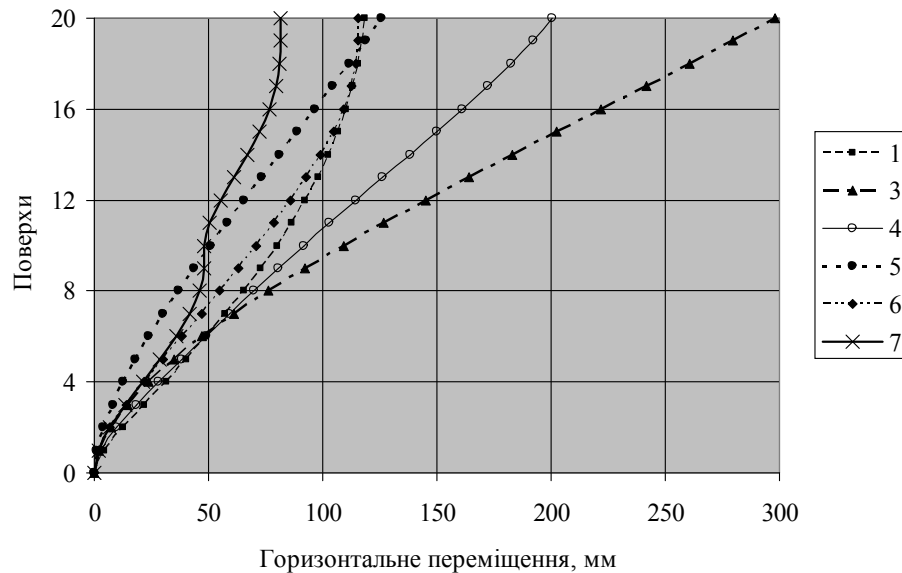


Рисунок 2 – Графіки зміни величини горизонтальних переміщень від вітрового навантаження по висоті для 20-ти поверхового будинку: 1, 3, 4, 5, 6, 7 – номери конструктивних схем описаних вище в тексті

Отримані дані щодо горизонтальних переміщень розглянутих варіантів будівель свідчать про те, що просторова жорсткість 5-ти і 10-ти поверхових будинків забезпечується для всіх розглянутих варіантів конструктивних систем.

Для 15-ти поверхової будівлі необхідне застосування рамної конструктивної системи або комбінованої з ядром жорсткості. Слід зазначити, що в разі влаштування чотирьох діафрагм жорсткості горизонтальні переміщення верхньої точки будівлі, визначені для прийнятого при моделюванні вітрового навантаження, дорівнюють гранично допустимим.

Що стосується 20-ти поверхової будівлі, то з усіх розглянутих варіантів достатній опір дії вітрових навантажень забезпечується лише при застосуванні комбінованої системи з ядром жорсткості та двома аутригерами, розташованими в рівні 20 та 8 поверхів. При цьому розрахункове значення горизонтальних переміщень (81.6 мм) істотно менше гранично допустимого, що становить 120 мм (відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.2-3:2006).

За результатами аналізу рівня використання несучої здатності елементів каркасу будівлі встановлено, що прийняті розміри поперечних перерізів колон (250x250 мм для 5-ти поверхової; 300x300 мм – для 10-ти поверхової; 400x400 – для 15-ти поверхової та 550x550 мм – для 20-ти поверхової) забезпечують несучу

здатність відповідно до вимог діючих нормативних документів. Слід відзначити, що вищенаведені розміри поперечного перерізу колон необхідно корегувати відповідно до вимог щодо класу вогнестійкості. Коефіцієнти використання несучої здатності колон 5-ти поверхової будівлі становлять 0,6..0,79; 10-ти поверхової – 0,71..0,91; 15-ти поверхової – 0,55..0,91 та 20-ти поверхової – 0,38..0,68. При цьому застосування аутригерів дозволяє зменшити величину поздовжньої сили, що виникає в колонах каркасу, до 10 % у випадку застосування одного аутригера в рівні 20 поверху та до 50% у випадку двох аутригерів в рівні 20 та 8 поверхів.

Для виявлення та аналізу впливу повзучості на напружено-деформований стан багатоповерхових будівель гібридної системи було прийнято варіант багатоповерхової гібридної будівлі комбінованої системи із ядром жорсткості. В якості матеріалу колон та балок було розглянуто клеєну деревину класу міцності GL28h та клеєного шпону (LVL) класу міцності LVL35P. Ядро жорсткості приймалося із залізобетону класу C20/25 товщиною 250 мм. При визначенні характеристик повзучості розглядалися умови середовища, що відповідають класифікації ДБН В.2.6-161:2017: клас експлуатації 1 – температура 20°C, річне коливання відносної вологості від 40 до 70% при переважному значенні $RH1 = 55\%$; клас експлуатації 2 – температура 20°C, річне коливання відносної вологості від 40 до 90% при переважному значенні $RH2 = 65\%$.

Результати моделювання з урахуванням повзучості показали, що реологічні властивості матеріалів істотно впливають на величину переміщень елементів каркасу. Порівняльні графіки максимальних вертикальних переміщень колон та ядра жорсткості через 10 років приведені на рис. 3.

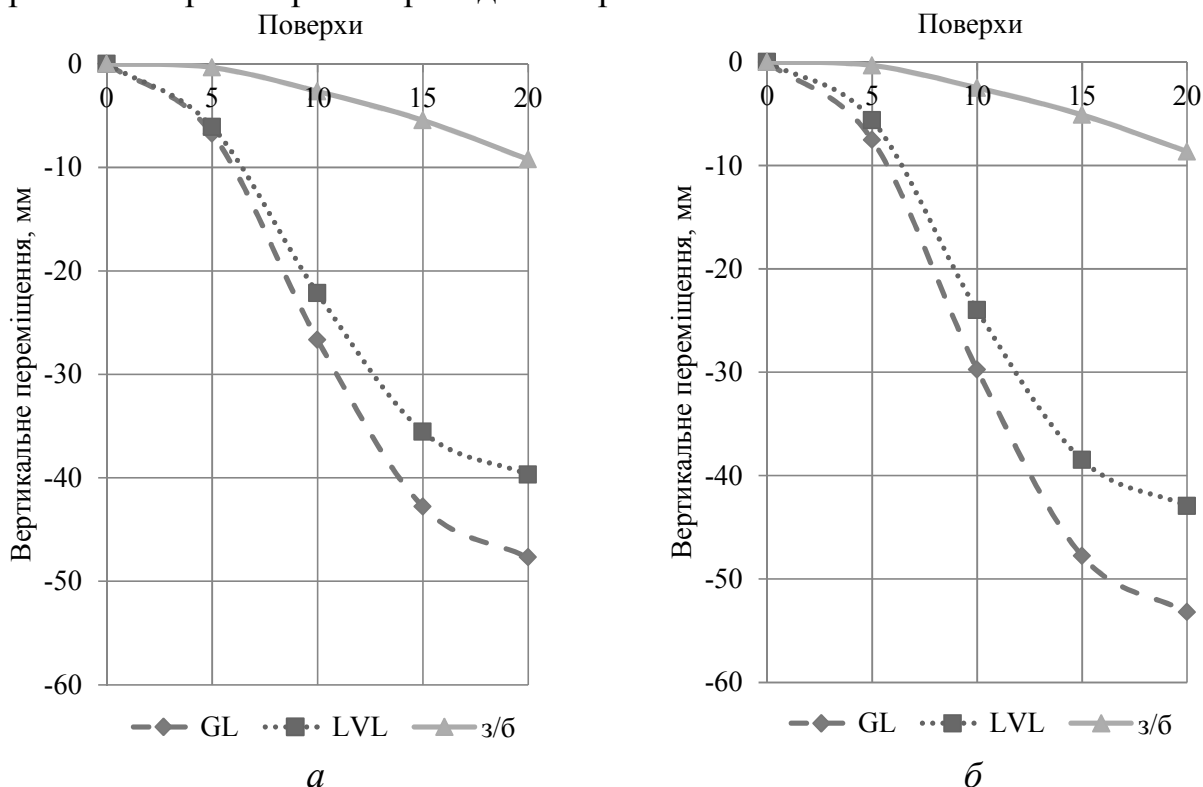


Рисунок 3 – Максимальні вертикальні переміщення колон та ядра жорсткості через 10 років для класу експлуатації: а) 1 ($RH1 = 55\%$); б) 2 ($RH2 = 65\%$) (GL – клеєна деревина, LVL – клеєний шпон, 3/б – залізобетонне ядро жорсткості)

Протягом 50 років вертикальні переміщення, отримані з урахуванням повзучості порівняно з результатами для пружної моделі розрахунку, збільшуються в кілька разів, а саме:

- при умовах класу експлуатації 1 в 2,6 – 3,7 разів для колон з клеєної деревини; 1,8 – 3,1 рази для колон з клеєного шпону (LVL) та 3,3 – 3,4 рази для залізобетонного ядра жорсткості;
- при умовах класу експлуатації 2 в 2,4 – 3,7 разів для колон з клеєної деревини; 1,8 – 2,9 рази для колон з клеєного шпону (LVL) та 3,05 – 3,15 рази для залізобетонного ядра жорсткості.

Окрім цього, виникає явище нерівномірного деформування, яке полягає в істотній різниці вертикальних переміщень колон та діафрагм або ядра жорсткості і обумовлює перекіс поверхових комірок та виникнення додаткових розтягуючих поздовжніх зусиль в балках перекриття.

Графіки зміни величини вертикальних переміщень на прикладі 20-ти поверхової будівлі комбінованої системи із ядром жорсткості приведені на рис. 4. Вертикальні переміщення, отримані з урахуванням повзучості, протягом 50 років збільшуються в 3,6 разів порівняно з результатами для пружної моделі розрахунку.

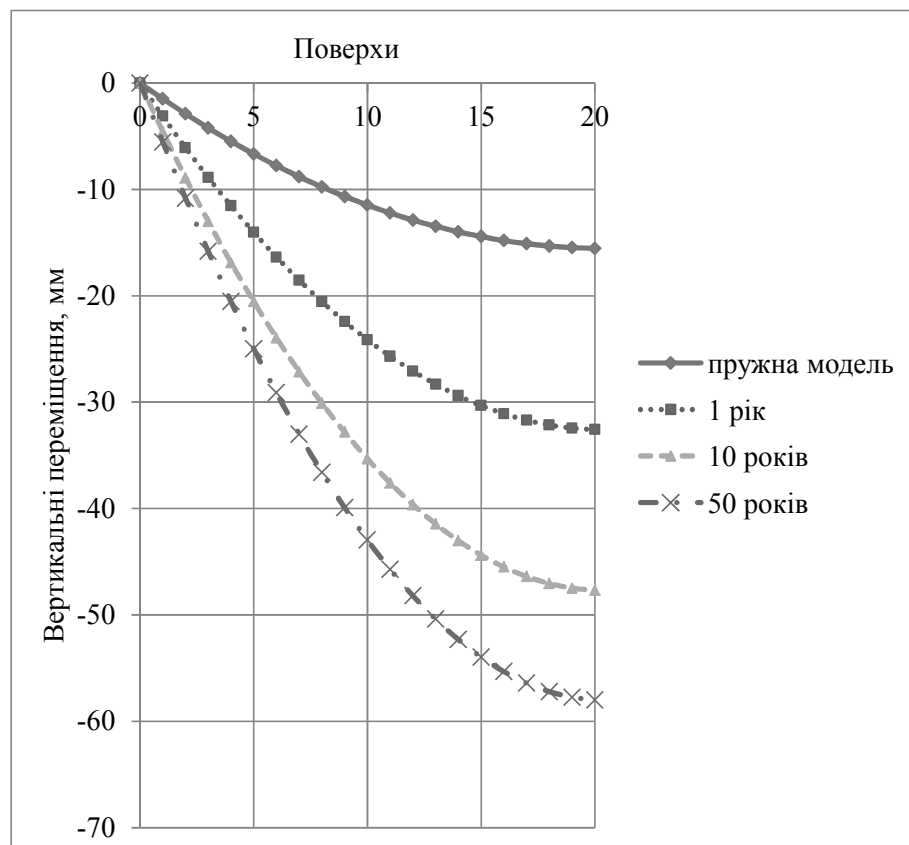


Рисунок 4 – Графіки зміни величини вертикальних переміщень по висоті 20-ти поверхового будинку комбінованої системи із ядром жорсткості

Додатково було проведено порівняльний аналіз отриманих даних щодо вертикальних переміщень дерев'яних колон каркасу за моделлю пружно-в'язко-пластичного тіла та згідно ДБН В.2.6-161:2017. Для цього при моделюванні будівель вводився приведений модуль пружності деревини через 50 років, отриманий з використанням коефіцієнту повзучості k_{def} . Отримані з використанням

приведеного модуля пружності деревини вертикальні переміщення колон каркасу через 50 років в порівнянні з результатами за моделлю пружно-в'язко-пластичного тіла для класу експлуатації 1 приведені в табл. 1.

Таблиця 1 - Порівняння вертикальних переміщень колон каркасу за моделлю пружно-в'язко-пластичного тіла та рекомендаціями норм ДБН В.2.6-161:2017 для умов класу експлуатації 1

Кількість поверхів	Вертикальні переміщення, мм					
	з урахуванням повзучості через 50 років					
	Клеєна деревина			Клеєний шпон (LVL)		
	модель	норми	k_{dif}	модель	норми	k_{dif}
5	-8,207	-5,556	1,48	-6,649	-5,833	1,14
10	-32,41	-18,98	1,71	-26,248	-19,927	1,32
15	-52,098	-23,305	2,24	-42,136	-24,47	1,72
20	-57,98	-24,884	2,33	-46,977	-26,127	1,80

Примітка: k_{dif} - коефіцієнт різниці, що визначається як $k_{dif} = \delta_{model} / \delta_{st}$, де δ_{model} – переміщення за моделлю пружно-в'язко-пластичного тіла; δ_{st} – переміщення за рекомендаціями норм ДБН В.2.6-161:2017.

Приведені дані свідчать про те, що отримані за рекомендаціями норм вертикальні переміщення порівняно з результатами за моделлю пружно-в'язко-пластичного тіла є заниженими в 1,48 – 2,33 рази для клеєної деревини та в 1,14 – 1,8 разів для клеєного шпону (LVL).

Таким чином, при проектуванні багатоповерхових гібридних будівель із застосуванням матеріалів з різними деформаційними та реологічними характеристиками слід враховувати вплив даних параметрів на несучу здатність та експлуатаційну придатність як окремих конструктивних та оздоблювальних елементів, інженерно-технічних систем, так і будівлі в цілому. При цьому для врахування повзучості деревини слід використовувати реологічні моделі, які враховують вплив умов експлуатації на характеристики повзучості.

З метою мінімізації ефектів нерівномірного деформування на етапах проектування запропоновано метод аналітичної оцінки та компенсації нерівномірних вертикальних переміщень елементів каркасу гібридних багатоповерхових деревозалізобетонних будівель.

Для визначення вертикальних переміщень несучих конструкцій гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель розглядається окрема пласка рама, яка складається з колон та балок з клеєної деревини, а також залізобетонної діафрагми. На рис. 5 приведено загальний вигляд поперечної рами, навантаження та деформовану схему колони. Внаслідок дії навантажень переміщення поступово накопичуються від опорного вузла і досягають максимального значення у верхній точці каркасу.

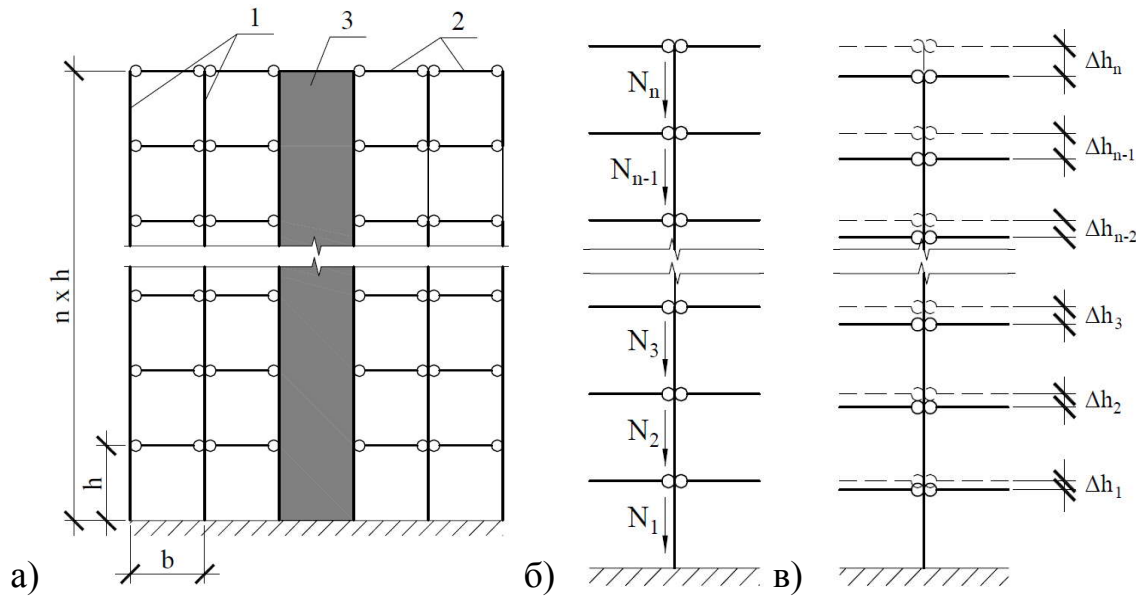


Рисунок 5 – До визначення вертикальних переміщень несучих конструкцій: а) схема поперечної рами; б) навантаження на колону; в) деформована схема колони; 1 – колони; 2 – балки; 3 - діафрагма або ядро жорсткості; b – розмір прольоту; h – висота поверху; n – кількість поверхів; $N_1 \dots N_n$ – навантаження на колону; $\Delta h_1 \dots \Delta h_n$ – вертикальне переміщення

Для визначення відносних деформацій бетону та клеєної деревини при стиску використовуються спрощені дволінійні діаграми напружено-деформованого стану. Повні переміщення колон обумовлені впливом деформаційних характеристик матеріалу як при короткочасних діях (пружні деформації), так і при довготривалих, які викликають повзучість. Повзучість враховується шляхом заміни модуля пружності E_i (E_{cd} – для бетону, E_0 – для деревини) на ефективний модуль пружності:

$$E_{i,eff}(t) = E_i / (1 + \varphi_{cr}), \quad (12)$$

де φ_{cr} – коефіцієнт повзучості бетону або деревини, який визначається за формулами (4) – (11).

Прогнозована величина вертикальних переміщень визначається за формулою:

$$\Delta h_n = \frac{\sum N_n}{E_{i,eff}(t) A_i} h, \quad (13)$$

де $\sum N_n$ – сумарне навантаження на колону n -го поверху; h – висота n -го поверху; A_i – площа поперечного перерізу конструкції.

Компенсація нерівномірних вертикальних переміщень полягає у визначенні таких розмірів поперечного перерізу вертикальних елементів, які забезпечать їх рівномірне деформування з урахуванням залежностей «напруження-деформація» та характеристик повзучості матеріалів при відповідності критеріям несучої здатності. Відповідно до методу групової компенсації, для зменшення кількості марок колон вони об'єднуються у групи по декілька поверхів.

Різниця між деформаціями, що відповідає нерівномірному переміщенню, $\Delta\varepsilon_i$ i -го поверху визначається як різниця в прогнозованих вертикальних деформаціях між двома елементами у суміжних прольотах:

$$\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_{t,i} - \varepsilon_{c,i}. \quad (14)$$

Корекція розмірів поперечного перерізу відповідає зміні площі поперечного перерізу, яка визначається за формулою:

$$\Delta A_i = (N_i \cdot h_n) / (\Delta\varepsilon_i \cdot E_i), \quad (15)$$

де N_i – поздовжня сила, що діє на колону; h_n – висота поверху; $\Delta\varepsilon_i$ - різниця між деформаціями, що відповідає нерівномірному переміщенню; E_i – модуль пружності з урахуванням повзучості.

Відповідно до методу групової компенсації, для зменшення кількості марок колон вони об'єднуються у групи по декілька поверхів. Якщо кількість поверхів у i -й групі дорівнює n , то усереднене значення коригування для вертикальних елементів кожного поверху в j -й групі можна визначити наступним чином:

$$\Delta A_j = (\Delta A_{1,j} + \Delta A_{2,j} + \dots + \Delta A_{n,j}) / n. \quad (16)$$

Згідно методу абсолютної компенсації похибка між сумою середніх значень корекції та сумою величин нерівномірного переміщення для n поверхів у j -й групі має дорівнювати нулю. Проте у випадку групової компенсації, коли призначається усереднене значення коригування, похибка становитиме:

$$\xi_j = n \cdot \Delta A_j - \sum_{i=1}^n \Delta A_{i,j} \neq 0. \quad (17)$$

Оскільки похибка попередньої групи впливає на наступну, середнє значення корекції для вертикальних елементів кожного поверху в j -й групі визначатиметься наступним чином:

$$\Delta A_j = \frac{\Delta A_{1,j} + \Delta A_{2,j} + \dots + \Delta A_{n,j} + \xi_{j-1}}{n}. \quad (18)$$

Після підбору компенсації виконується перевірка за критерієм граничної величини нерівномірних вертикальних переміщень:

$$\delta_{i,j}^{comp} \leq [\delta_{i,j}]. \quad (19)$$

де $\delta_{i,j}^{comp}$ - різниця у величині вертикальних переміщень на рівні i -го поверху в j -й

групі, визначена з урахуванням компенсації (корекції розмірів поперечного перерізу); $[\delta_{i,j}]$ - гранично допустима різниця у величині вертикальних переміщень.

На основі отриманих результатів сформульовано рекомендації щодо розрахунку гібридних багатоповерхових деревозалізобетонних будівель, які включають вимоги до фізичної моделі будівлі, призначення характеристик матеріалів, методи визначення параметрів напружено-деформованого стану, моделювання з'єднань, а також необхідні перевірки за результатами розрахунку.

В **четвертому розділі** приведені результати експериментальних досліджень матеріалів та виробів для гібридних багатоповерхових деревозалізобетонних будівель.

З метою класифікації клеєної деревини вітчизняного виробництва за міцністю відповідно до чинних стандартів, гармонізованих з нормами Європейського Союзу, проведені випробування на розтяг вздовж волокон окремих ламелей (цільної деревини). В результаті випробувань зразків на розтяг вздовж волокон було отримано руйнівне навантаження, а також визначено характер руйнування деревини (рис. 6). За отриманими даними для кожного зразка з використанням формул, приведених в EN 1194:1999, було визначено міцність та модуль пружності при розтязі вздовж волокон.

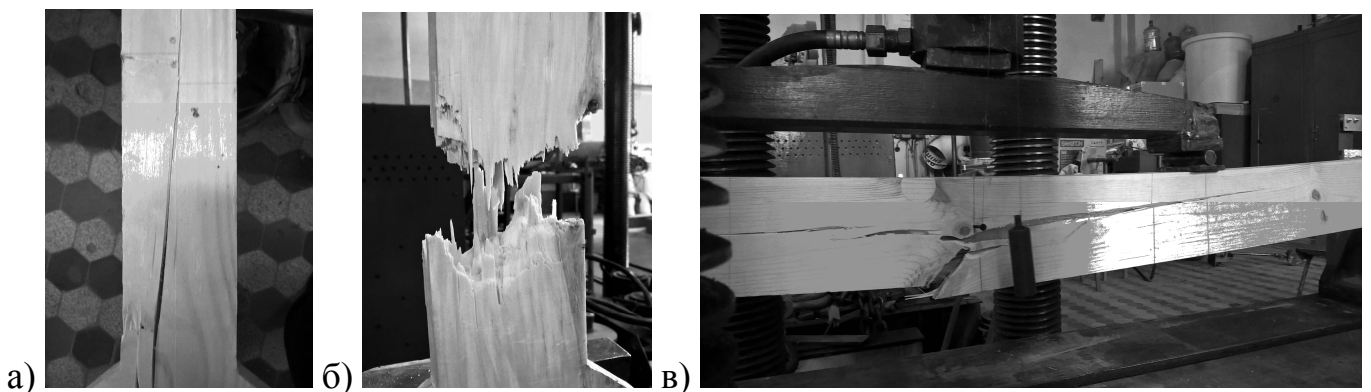


Рисунок 6 – Характер руйнування зразків при випробуванні на розтяг: а) в зоні захвату; б) по волокнам та в) балок при випробуванні на згин

В результаті обробки експериментальних даних були отримані наступні значення характеристик: міцність ламелі на розтяг вздовж волокон $f_{t,0,l,k} = 18,73 \text{ Н/мм}^2$, модуль пружності $E_{0,l,mean} = 15092 \text{ Н/мм}^2$ та густина 467 кг/м^3 . З використанням кореляційних залежностей, наведених в EN 1194:1999, визначені відповідні фізико-механічні характеристики, згідно з якими клеєна деревина була класифікована як GL28h.

Для оцінки несучої здатності клеєної деревини згідно визначеного класу міцності були виконані випробування стандартних зразків (балок) на згин. За даними випробувань балки характеризуються незначними розбіжностями значень руйнівного навантаження, що свідчить про однорідність властивостей. Експериментально визначена міцність на згин становить $45.75 - 53.75 \text{ Н/мм}^2$, що в $1.63 - 1.92$ рази перевищує теоретичне значення характеристичної міцності.

Проведені випробування на згин при дії зосередженого навантаження в

середині прольоту натурних клеєдерев'яних балок, виготовлених з пиломатеріалів деревини сосни (рис. 7). Розміри поперечного перерізу балки: ширина 120 мм, висота 180 мм. Довжина балки 9880 мм. Кожна балка складалася з 9 шарів, склеєних між собою ламелей завтовшки 20 мм.



а



б

Рисунок 7 – Випробування натурних клеєдерев'яних балок: а) загальний вигляд в процесі навантаження; б) характер руйнування

Руйнування балок відбувалося у розтягнутій зоні на ділянці максимального згинального моменту при навантаженні 14,13-14,69 кН, що в 1,68 та 1,74 рази перевищує теоретично визначене. Прогин перед руйнуванням становив 251 – 275 мм, що в 1,24 та 1,35 рази перевищує теоретично визначені значення. Графік залежності прогину від навантаження для випробуваних натурних балок приведено на рис. 8.

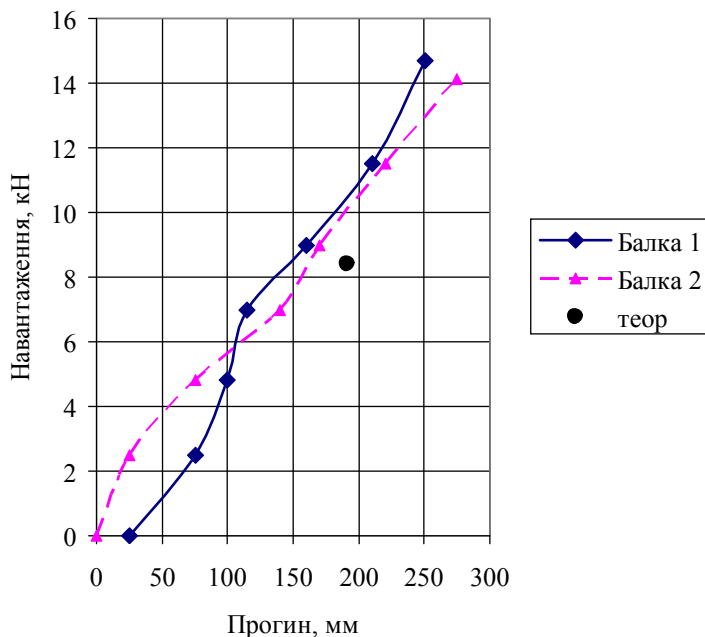


Рисунок 8 – Графіки залежності прогину від навантаження для натурних балок

Для дослідження міцності та особливостей деформування деревини при вдавлюванні металевго нагеля (зминання деревини отвору) запропоновано методику та проведено експериментальне дослідження із застосуванням методів оптичної фізики (лазерної голографічної інтерферометрії). При випробуваннях вимірювалось вертикальне зміщення нагеля (болта) відносно випробуваного зразка. Для забезпечення одночасної реєстрації поля переміщень (інтерферограм) поверхні зразка була розроблена оптична схема, загальний вигляд якої приведено на рис. 9, а. Загальний вигляд зразка в процесі випробувань приведено на рис. 9, б.

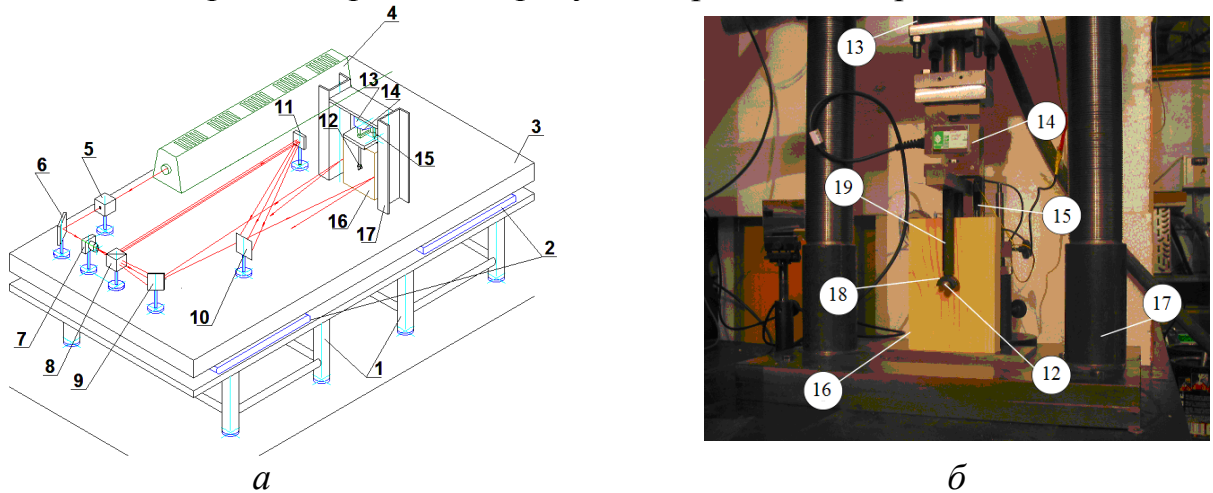


Рисунок 9 – Оптична схема (а) та загальний вигляд зразка для випробування на вдавлювання (б): 1 – опори; 2 – амортизатори; 3 – віброзахищена платформа; 4 – лазер; 5 – оптичний затвор; 6, 9, 11 – дзеркала; 7 – мікрооб’єктив; 8 – світлоподільувач; 10 – фотопластинка; 12 – нагель; 13 – гідроциліндр; 14 – датчик зусилля; 15 – датчик переміщення; 16 – зразок; 17 – прес; 18 – ложемент нагеля, 19 – силовий шток

В результаті випробувань були отримані криві залежностей «навантаження-переміщення» (рис. 10, а), а також інтерферограми поверхні та тривимірні графіки деформованої поверхні зразка, які наочно відображають характер та еволюцію взаємодії болта з деревиною (рис. 10, б) та можуть бути використані для верифікації розрахункової скінченноелементної моделі з’єднання.

Руйнування зразків відбувалося внаслідок досягнення граничних деформацій з утворенням тріщин при навантаженні 19,5-21 кН. За отриманими даними було визначено міцність деревини на зминання в отворі, яка становила $f_h = 54,2 - 58,3$ МПа.

Проведені експериментальні дослідження болтового з’єднання дерев’яних елементів на розтяг вздовж волокон. Зразок для дослідження виконаний у вигляді фрагменту реальної конструкції і являє собою дерево-металеву конструкцію, яка складається з клеєного дерев’яного бруса довжиною 750 мм, перерізом 120x120 мм та врізаної в масив деревини металеві пластини. Клеєний брус виготовлений з пиломатеріалів деревини сосни 2 сорту. Товщина пластини становить 6 мм, ширина - 80 мм. Спільна робота бруса та пластини забезпечується за рахунок 3 болтів діаметром 12 мм. Загальний вигляд зразка під час випробування приведено на рис. 11.

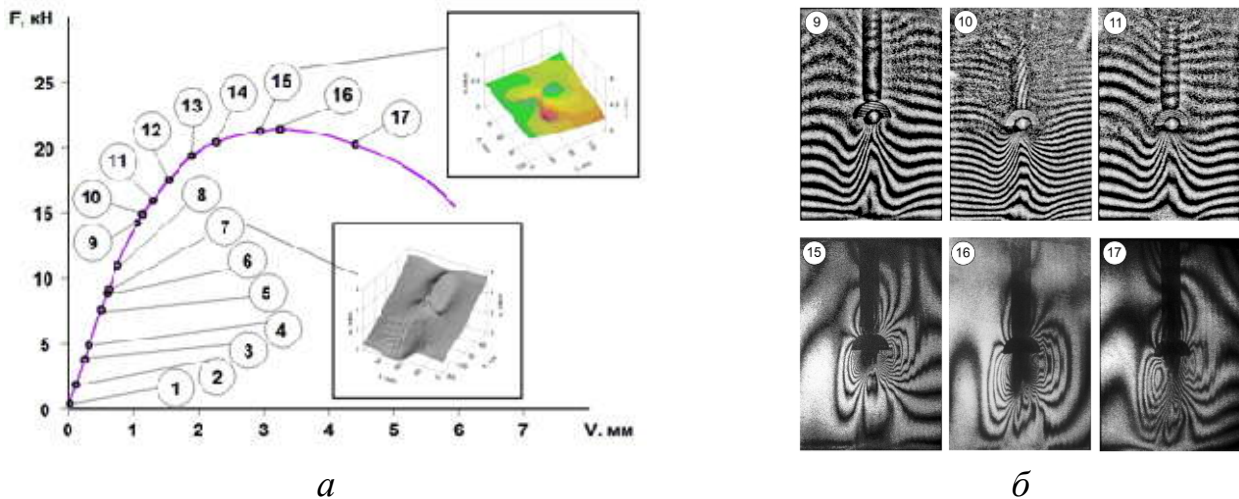


Рисунок 10 – Характерний графік залежності «навантаження-переміщення» та 3D-візуалізація деформованої поверхні (а) та інтерферограми поверхні зразка (б)

В результаті експерименту отримано значення руйнівного навантаження, яке склало 113,7 кН, а також графік залежності переміщень зразка від величини розтягуючого навантаження (рис. 12). Робота зразка при значенні навантаження до 80 кН характеризується близькою до лінійної залежністю, після чого виникають нелінійні деформації, зумовлені змінанням деревини та згинанням болтів. Аналіз форми згину болтів дозволяє припустити, що в конструкції перерозподіл зусиль відбувається рівномірно.

З урахуванням чинних норм визначені теоретичні значення несучої здатності з'єднання відповідно до можливих форм руйнування, які склали $F_{min} = 36,9$ кН та $F_{max} = 100,8$ кН. Експериментальне значення, відрізняється від теоретичних, на 67,5% та 11,3 %, відповідно. Згідно отриманих даних, основним параметром, що обумовлює несучу здатність з'єднання, є міцність деревини отвору на змінання.

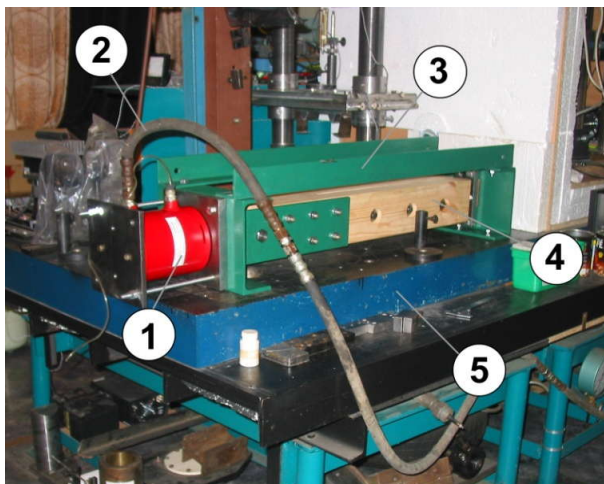


Рисунок 11 – Випробувальне оснащення в змонтованому вигляді:

1 – гідроциліндр; 2 – шланг гідросистеми; 3 – випробувальне оснащення; 4 - зразок; 5 - опорна плита

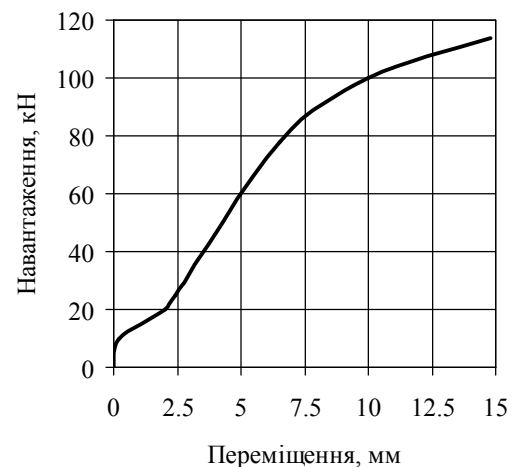


Рисунок 12 – Графік залежності переміщень зразка болтового з'єднання від величини навантаження розтягу

Приведено результати випробувань з'єднань дерев'яних елементів на металевих зубчастих пластинах на розтяг та згин. Отримані графіки залежностей переміщень від величини навантаження та досліджено вплив конфігурації з'єднання на його роботу під навантаженням.

Загалом отриманий комплекс експериментальних даних щодо фізико-механічних характеристик конструкцій та з'єднань елементів з клеєної деревини вітчизняного виробництва свідчить про можливість їх використання для виготовлення несучих конструкцій багатоповерхових будівель гібридної системи.

В п'ятому розділі викладені результати розробки та удосконалення методів розрахунку конструкцій та вузлів з'єднань гібридних багатоповерхових деревозалізобетонних будівель.

НДС з'єднання дерев'яного та бетонного елементів на металевих зв'язках нагельного типу обумовлюється особливостями взаємодії сталевого з'єднувального елемента з деревиною та бетоном і характеризується модулем ковзання, який визначається як тангенс кута нахилу січної до графіка деформування з'єднання у точках, що відповідають певній величині навантаження та переміщення. Характерний вигляд діаграми навантаження-переміщення приведено на рис. 13.

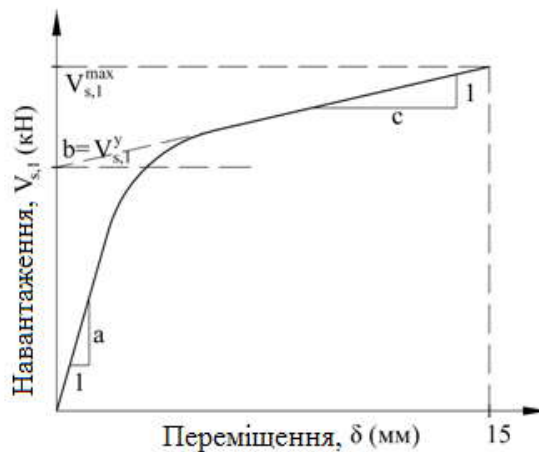


Рисунок 13 – Характерний вид і параметри діаграми деформування нагельного з'єднання

Залежність для математичного опису діаграми деформування з'єднання на металевих зв'язках нагельного типу має вигляд:

$$V_{s,1}(\delta) = (c + b\delta) \left(1 - e^{-\frac{a\delta}{c}} \right), \quad (20)$$

де a – коефіцієнт, що визначається як тангенс кута нахилу дотичної, проведеної з початку координат, до графіка деформування; b – коефіцієнт, що дорівнює зсувній силі на межі пропорційності; c – коефіцієнт, що визначається як тангенс кута нахилу дотичної до графіка на ділянці, що відповідає текучості з'єднання.

При розрахунку гібридних деревозалізобетонних конструкцій з урахуванням нелінійного характеру роботи з'єднання запропонована залежність модуля ковзання:

$$K(\delta) = \frac{V_{s,1}(\delta)}{\delta} = \frac{1}{\delta} (c + b\delta) \left(1 - e^{\frac{-a\delta}{c}} \right). \quad (21)$$

Розроблено чисельно-аналітичний метод оцінки напружено-деформованого стану деревозалізобетонної конструкції. Характеристики напружено-деформованого стану визначаються шляхом розв'язання системи рівнянь рівноваги єдиного стрижневого елемента з урахуванням діаграм деформування матеріалів і з'єднань, а також ступеня спільної роботи.

Визначення внутрішніх деформацій і напружень в перерізі конструкції базується на умові рівноваги зовнішніх і внутрішніх зусиль в перерізах. Схеми внутрішніх напружень та деформацій в перерізі гібридного деревозалізобетонного елемента приведені на рис. 14.

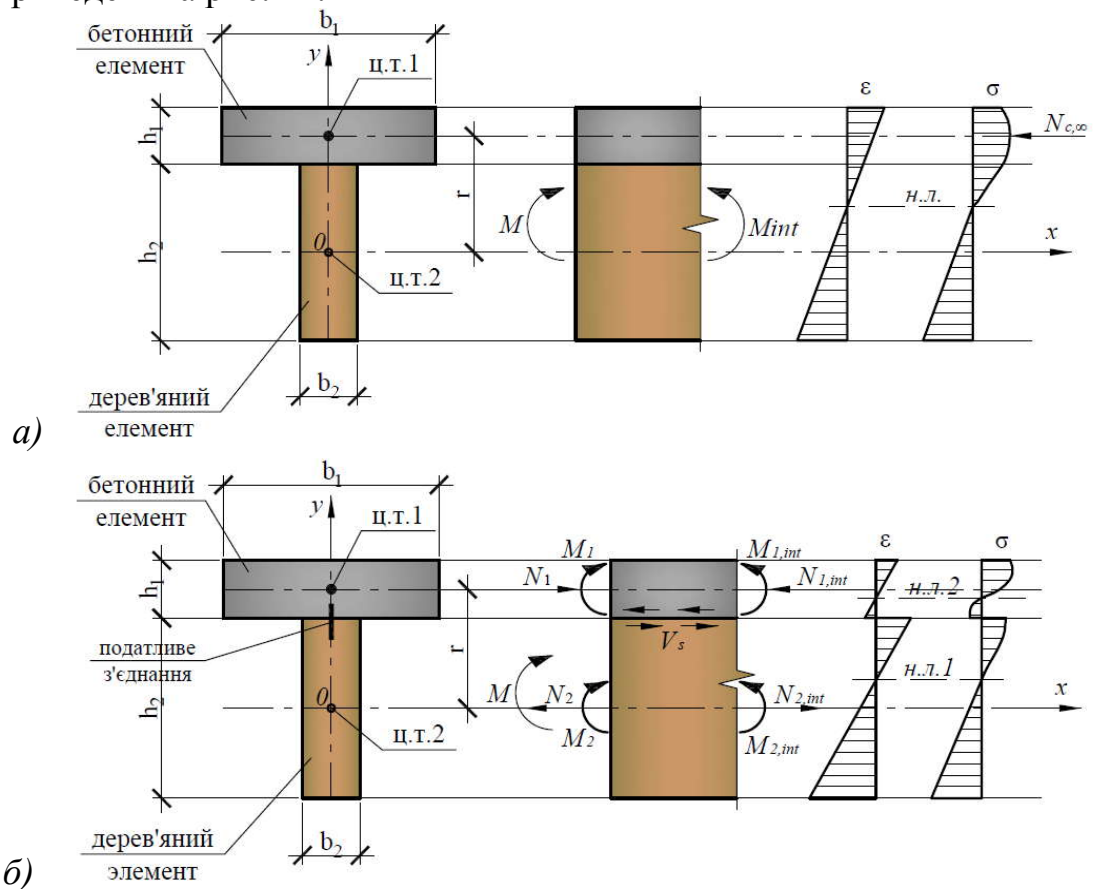


Рисунок 14 – Схеми внутрішніх напружень та деформацій в перерізі гібридного деревозалізобетонного елемента: а) за умови сумісної роботи; б) з урахуванням податливості з'єднання

У разі сумісної роботи компонентів конструкції під дією згинального моменту цю умову можна записати у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} \int_{A_1} \sigma_1 dA_1 + \int_{A_2} \sigma_2 dA_2 = 0 \\ \int_{A_1} \sigma_1 z dA_1 + \int_{A_2} \sigma_2 z dA_2 - M = 0 \end{cases} \quad (22)$$

Напруження в елементах конструкції залежать від величини відносних деформацій, тобто $\sigma_1 = f_1(\varepsilon)$, $\sigma_2 = f_2(\varepsilon)$. Виходячи з гіпотези плоских перерізів, деформації по висоті перерізу розподіляються по лінійній залежності, яка має вигляд:

$$\varepsilon = u + \varphi y, \quad (23)$$

де u – поздовжня деформація внаслідок стиску або розтягу; φ – кривизна елемента; y – координата висоти перерізу.

Розв'язуючи систему рівнянь (22) щодо невідомих u і φ , можна визначити значення поздовжньої сили в бетонному елементі:

$$N_{c,\infty} = \int_{A_1} \sigma_1(u_{solv}, \varphi_{solv}) dA_1, \quad (24)$$

де u_{solv} , φ_{solv} – розв'язок системи рівнянь.

Перерозподіл зусиль в перерізі внаслідок податливості з'єднань елементів при розрахунку враховується шляхом введення коефіцієнта спільної роботи. Тоді поздовжню силу в бетонному елементі можна представити через коефіцієнт сумісної роботи:

$$N_1 = \gamma N_{c,\infty}, \quad (25)$$

де $N_{c,\infty}$ – поздовжня сила, визначена з умови спільної роботи перерізу; γ – коефіцієнт спільної роботи, який враховує характеристики з'єднання елементів і в загальному вигляді може бути записаний як:

$$\gamma = f[K, G, S, W, C], \quad (26)$$

де K , G , S – тип, геометричні параметри та крок з'єднувального елемента, відповідно; W – клас міцності деревини; C – клас бетону.

Тоді поздовжня сила, що діє на дерев'яний елемент, дорівнює $N_2 = -N_1$.

Деформації по висоті перерізу бетонного елемента ε_1 і дерев'яної балки ε_2 можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = u_1 + \varphi(y - r) \\ \varepsilon_2 = u_2 + \varphi y \end{cases}, \quad (27)$$

де u_1 , u_2 – поздовжня деформація бетонного і дерев'яного елемента, відповідно; φ – кривизна елемента; y – координата висоти перерізу; r – відстань між центрами ваги бетонного і дерев'яного елементів.

При врахуванні впливу податливості з'єднань система рівнянь рівноваги набуде вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{A_1} \sigma_1 dA_1 - N_1 = 0 \\ \int_{A_2} \sigma_2 dA_2 + N_2 = 0 \\ \int_{A_1} \sigma_1 z dA_1 + \int_{A_2} \sigma_2 z dA_2 - M = 0 \end{array} \right. . \quad (28)$$

В системі рівнянь (28) внутрішні зусилля дорівнюють:

$$N_{1,\text{int}} = \int_{A_1} \sigma_1 dA_1 , \quad (29)$$

$$N_{2,\text{int}} = \int_{A_2} \sigma_2 dA_2 , \quad (30)$$

$$M_{\text{int}} = M_{1,\text{int}} + M_{2,\text{int}} = \int_{A_1} \sigma_1 z dA_1 + \int_{A_2} \sigma_2 z dA_2 . \quad (31)$$

Невідомими в системі рівнянь є поздовжні деформації u_1 , u_2 та кривизна φ . У матричній формі система (28) буде мати вигляд:

$$F_{\text{int}}(X) - F_d = 0, \quad (32)$$

де $X = [u_1 \quad u_2 \quad \varphi]^T$ - вектор невідомих; $F_{\text{int}} = [N_{1,\text{int}} \quad N_{2,\text{int}} \quad M_{\text{int}}]^T$ - вектор внутрішніх зусиль; $F_d = [N_1 \quad N_2 \quad M]^T$ - вектор зовнішніх зусиль.

Для розв'язання отриманої системи рівнянь використовується метод Ньютона, формула для знаходження невідомих має вигляд:

$$X^{k+1} = X^k - W^{-1}(X^k) \cdot (F_{\text{int}}(X^k) - F_d), \quad (33)$$

де $f_1(X) = N_{1,\text{int}} - N_1$; $f_2(X) = N_{2,\text{int}} - N_2$; $f_3(X) = M_{\text{int}} - M$; $W(X^k)$ - матриця Якобі:

$$W(X^k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(X^k)}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1(X^k)}{\partial u_2} & \frac{\partial f_1(X^k)}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_2(X^k)}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2(X^k)}{\partial u_2} & \frac{\partial f_2(X^k)}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_3(X^k)}{\partial u_1} & \frac{\partial f_3(X^k)}{\partial u_2} & \frac{\partial f_3(X^k)}{\partial \varphi} \end{bmatrix} . \quad (34)$$

За отриманими значеннями поздовжніх деформацій та кривизни, з використанням формул (27) обчислюються деформації бетонного та дерев'яного елементів. За діаграмами деформування матеріалів визначаються нормальні напруження та виконуються перевірки міцності.

Розроблена інженерна методика розрахунку згинальних деревозалізобетонних елементів з урахуванням нелінійного характеру роботи з'єднання. Розрахункова схема та основні параметри поперечного перерізу наведені на рис. 15.

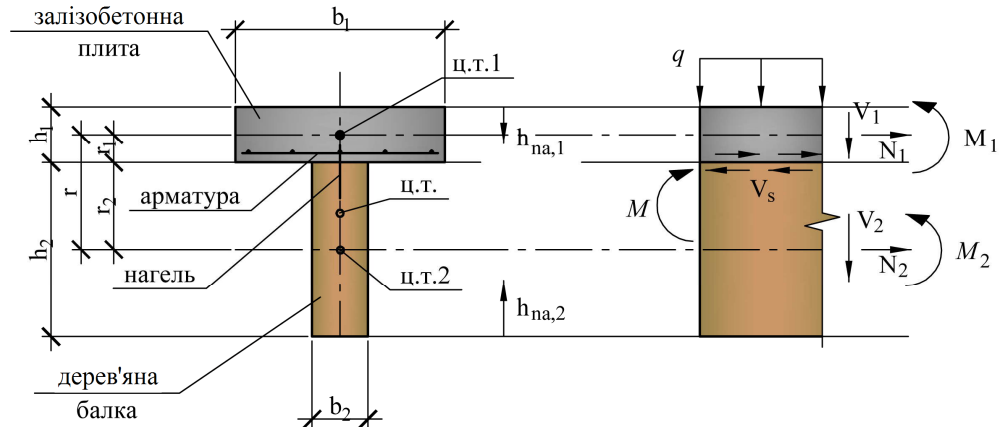


Рисунок 15 – Розрахункова схема і основні параметри поперечного перерізу деревозалізобетонного елемента, що працює на згин: h_1 , h_2 , b_1 , b_2 – висота і ширина бетонної плити і дерев'яної балки, відповідно; r – відстань між центрами ваги бетонної плити і дерев'яної балки; M_1 , M_2 – згинальні моменти; V_1 , V_2 – поперечна сила; V_s – розподілена по довжині зсувна сила на кордоні контакту; N_1 , N_2 – поздовжня сила в бетонній плиті і дерев'яній балці

Розрахунок складеного деревозалізобетонного згинального елемента з урахуванням нелінійного характеру роботи з'єднання виконується з використанням методу простої ітерації, алгоритм якого приведено на рис. 16. Отримані значення внутрішніх зусиль (нормальних напружень) в елементах конструкції використовуються для перевірки умов міцності згідно чинних норм проектування дерев'яних та залізобетонних конструкцій.

З використанням запропонованої методики розрахунку був виконаний чисельний експеримент, спрямований на виявлення впливу нелінійного характеру роботи з'єднання і роботи арматури в розтягнутій зоні плити на несучу здатність деревозалізобетонного згинального елемента. Суть експерименту полягала в співставленні ефективної жорсткості і внутрішніх напружень за запропонованим методом і лінійно-пружною моделлю. Дослідження проводилося на прикладі шарнірно опертої однопрольотної деревозалізобетонної балки таврового поперечного перерізу, що складається із залізобетонної плити перерізом $b_1 \times h_1 = 500 \times 50$ мм і дерев'яної балки перерізом $b_2 \times h_2 = 50 \times 200$ мм. Плита виконана з важкого бетону класу міцності C20/25, балка - з деревини сосни класу міцності C24. Для з'єднання балки з плитою прийнято нагель діаметром 5 мм із сталі класу міцності 4.8 ($f_y = 320$ МПа, $f_u = 400$ МПа). Нагелі розташовані в один ряд по довжині балки з кроком 300 мм. Проліт балки прийнятий рівним $L = 3, 4$ і 5 м. Балка навантажена рівномірно розподіленим по довжині навантаженням інтенсивністю q .

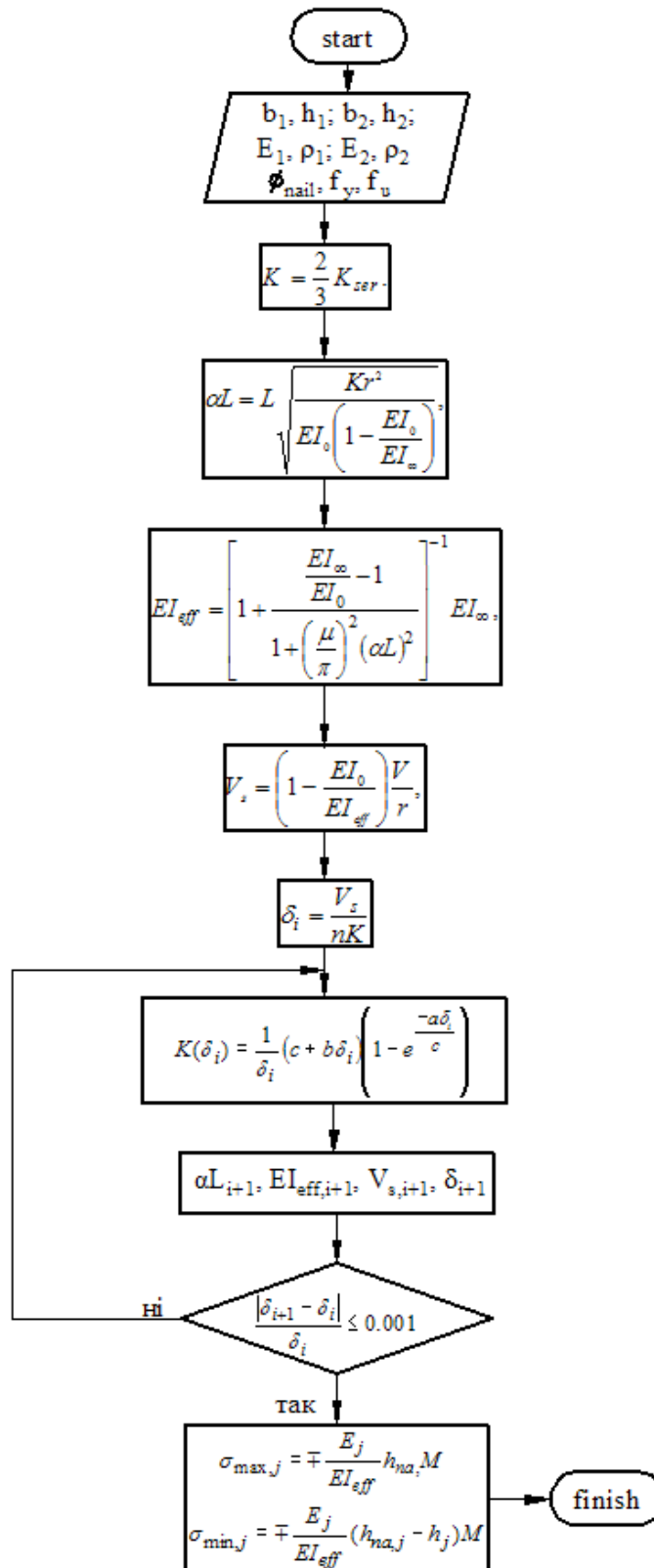


Рисунок 16 – Блок-схема розрахунку деревозалізобетонного згинального елемента з урахуванням нелінійного характеру роботи з'єднання: K – модуль ковзання з'єднання, виходячи з умови лінійно-пружної роботи з'єднання; αL – коефіцієнт спільної роботи; EI_{eff} – ефективна згинальна жорсткість; V_s – розподілена по довжині зсувна сила на межі контакту; δ – переміщення з'єднання (взаємний зсув елементів конструкції); $\sigma_{max,j}$, $\sigma_{min,j}$ – нормальні напруження в перерізі елементів; $j=1$ – для залізобетонного елемента; $j=2$ – для дерев'яного елемента

Діаграма деформування нагельного з'єднання, а також графік зміни модуля ковзання в залежності від навантаження, побудовані з використанням залежності (21), наведені на рис. 17. Графіки залежності ефективної жорсткості перерізу від навантаження приведені на рис. 18. Значення нормальних напружень в залежності від величини навантаження на прикладі балки прольотом 5 м приведені в табл. 2.

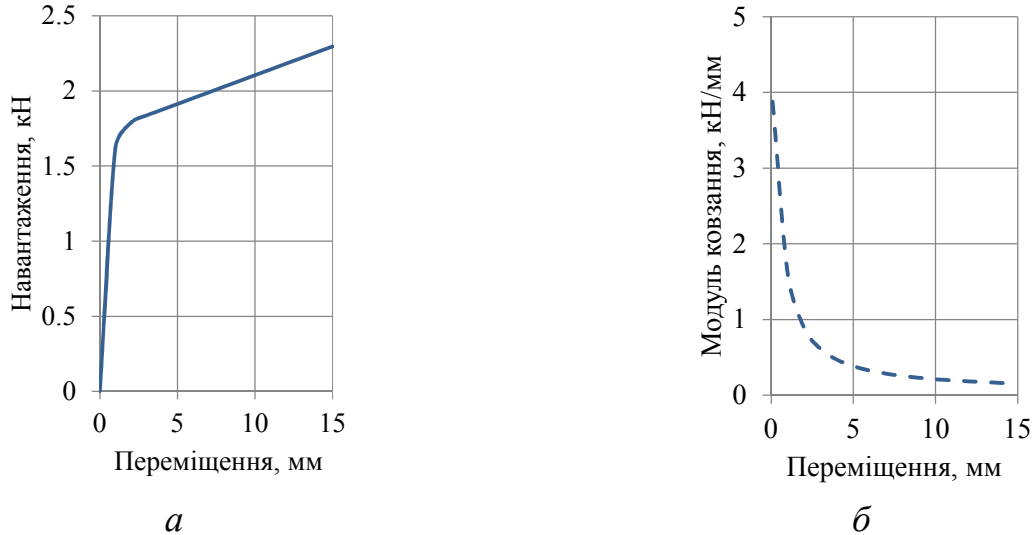


Рисунок 17 – Параметри нагельного з'єднання: *а* – діаграма деформування нагельного з'єднання; *б* – модуль ковзання

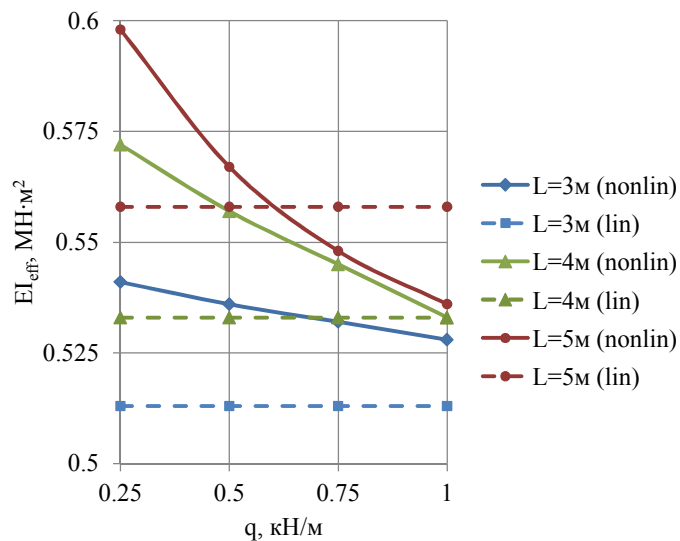


Рисунок 18 – Графік залежності ефективної жорсткості від навантаження по лінійно-пружній (*lin*) і нелінійній моделі роботи з'єднання (*nonlin*)

За графіками на рис. 18 видно, що для прольоту $L = 3$ і 4 м значення ефективної жорсткості по лінійно-пружній моделі нижче, ніж визначені з урахуванням нелінійного характеру роботи з'єднання. При цьому зі збільшенням навантаження ступінь спільної роботи знижується. Дана особливість яскраво простежується для прольоту $L = 5$ м - з графіка видно, що при навантаженні понад 0.6 кН/м ефективна жорсткість з урахуванням нелінійної роботи з'єднання нижче, ніж для лінійної моделі.

Таблиця 2 – Значення нормальних напружень в залежності від величини навантаження для балки прольотом 5 м

q, кН/м	Нормальні напруження в залізобетонній плиті, МПа						Нормальні напруження в дерев'яній балці, МПа					
	$\sigma_{max,1}$			$\sigma_{min,1}$			$\sigma_{max,2}$			$\sigma_{min,2}$		
	лін	нелін	%	лін	нелін	%	лін	нелін	%	лін	нелін	%
0.25	-0.87	-0.86	1.2	0.83	0.81	2.2	1.67	1.66	1.0	1.57	-1.53	2.3
0.5	-1.74	-1.77	1.6	1.65	1.70	3.0	3.34	3.39	-1.5	3.14	-3.24	3.1
0.75	-2.60	-2.68	3.0	2.48	2.62	5.3	5.02	5.15	-2.5	4.71	-5.00	5.8
1	-3.47	-3.61	3.9	3.31	3.54	6.5	6.69	6.92	-3.3	6.28	-6.76	7.1

Чим вище значення ефективної жорсткості складеного елемента, тим вище його ступінь спільної роботи і менше значення внутрішніх зусиль, відповідно, вище несуча здатність. При значеннях навантаження 0.25-0.5 кН/м напруження в елементах конструкції по лінійній моделі вище значень, визначених з урахуванням нелінійної роботи. Розбіжність в отриманих значеннях становить 1-8 % і зменшується зі збільшенням навантаження. При навантаженнях, що відповідають пластичним деформаціям з'єднання, напруження по лінійно-пружній моделі виявляються заниженими.

При величинах навантаження, що перевищують 0,75 кН/м.п. для балки прольотом 3 м та 0,5 кН/м.п. для балки прольотом 5 м, напруження в розтягнутій зоні бетонної плити перевищують міцність бетону на розтяг, в той час як напруження в дерев'яній балці не досягають гранично допустимих значень. Фактично в поперечному перерізі плити виникає тріщина, а зусилля розтягу сприймає арматура. Таким чином, при розрахунку конструкції без урахування роботи арматури, несуча здатність є недовикористаною.

Виходячи з конструктивних особливостей деревозалізобетонних перекриттів (товщини плити і захисного шару) виконаний аналіз несучої здатності з урахуванням армування. Встановлено, що несуча здатність плити забезпечує сприйняття розрахункового згинального моменту до навантажень, що викликають руйнування дерев'яної балки. При цьому дотримуються умови раціональної роботи стиснутого бетону і розтягнутої арматури.

Удосконалено метод моделювання напружено-деформованого стану з'єднань дерев'яних конструкцій на металевих зв'язках нагельного типу шляхом розбиття масиву деревини на дві області – глобальну з нормованими значеннями фізико-механічних властивостей деревини та локальну в зоні змінання з приведеними характеристиками. Встановлено, що локальна область представляє собою циліндричний об'єм з розмірами, пропорційними діаметру кріплення. Основа циліндра обмежена еліпсом, розміри якого становлять: мала напіввісь $a=1.8..2.5d$; велика напіввісь $b=3.5..4d$ (де d – діаметр нагеля). У разі використання групи металевих зв'язків відповідні їм локальні області об'єднуються в загальний обсяг. З метою верифікації запропонованого способу визначення характеристик деревини в з'єднанні на металевих зв'язках в ПК ANSYS 14.5 було виконано тестове моделювання зразків деревини, випробуваних на змінання з фіксацією деформацій

поверхні. Ізополя деформацій, отримані в результаті моделювання, було порівняно з інтерферограмами зразків (рис. 19).

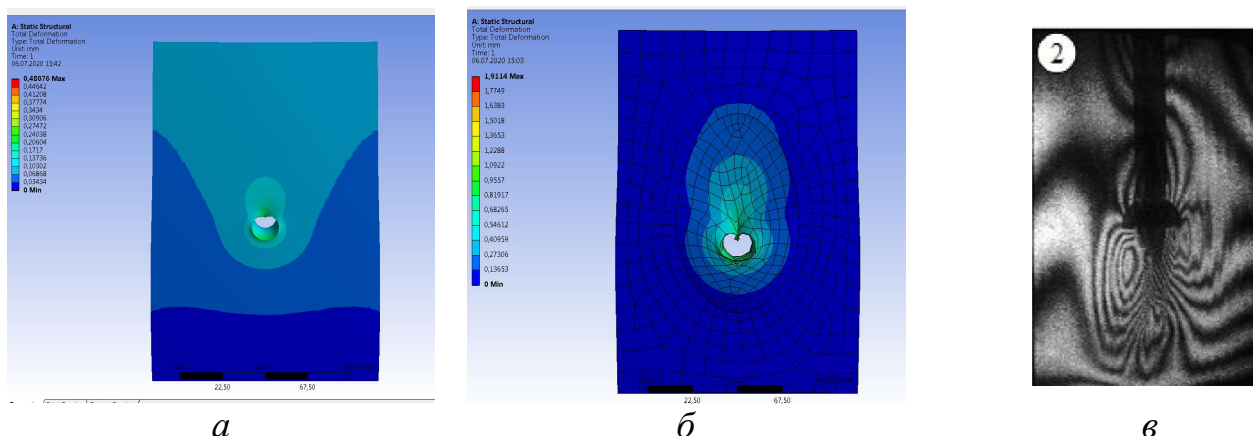


Рисунок 19 – Ізополя переміщень тестових моделей при навантаженні 20 кН: *а* – без урахування локальної області; *б* – з урахуванням локальної області; *в* – відповідна інтерферограма

Порівняння отриманих ізополів з відповідними інтерферограмами показує, що введення в модель локальної області з наведеними характеристиками дозволяє достовірно відображати характер деформування зразка. При цьому вертикальні переміщення даної моделі менше експериментальних на 23 - 25%.

Аналогічним чином було виконано моделювання роботи багатоболтового з'єднання з металевою пластиною на розтяг. Встановлено, що модель достатньо точно відображає роботу з'єднання під навантаженням. Схема деформування складових елементів відповідає експериментальним. Різниця між отриманими значеннями максимальних вертикальних переміщень згідно розрахунку скінченноелементної моделі та експерименту складає 10.4 %. Таким чином, запропонований підхід дозволяє моделювати напружено-деформований стан деревометалевих з'єднань з урахуванням їх реальної роботи.

Запропонована інженерна методика розрахунку вузлів сполучення клеєної дерев'яної балки та колони, оснований на методі дискретизації вузла на окремі компоненти, для кожного з яких виконуються відповідні перевірки.

В шарнірному вузлі (рис. 20, а) опорна реакція від балки на колону передається через болтове з'єднання та Т-подібний зварний металевий елемент. Несуча здатність з'єднання даного типу визначається: міцністю болтів в колоні на зріз; міцністю металу Т-подібної пластини на зминання в отворі; несучою здатністю болтового з'єднання в дерев'яному елементі на площину зрізу. Умова міцності для шарнірного вузла запишеться наступним чином:

$$V_d \leq \min(F_{bs}; F_{bp}; F_{v,Rd}), \quad (35)$$

де V_d – розрахункова опорна реакція від балки; F_{bs} – несуча здатність болтів на зріз; F_{bp} – несуча здатність пластини на зминання в отворах; $F_{v,Rd}$ – несуча здатність болтового з'єднання в дерев'яному елементі.

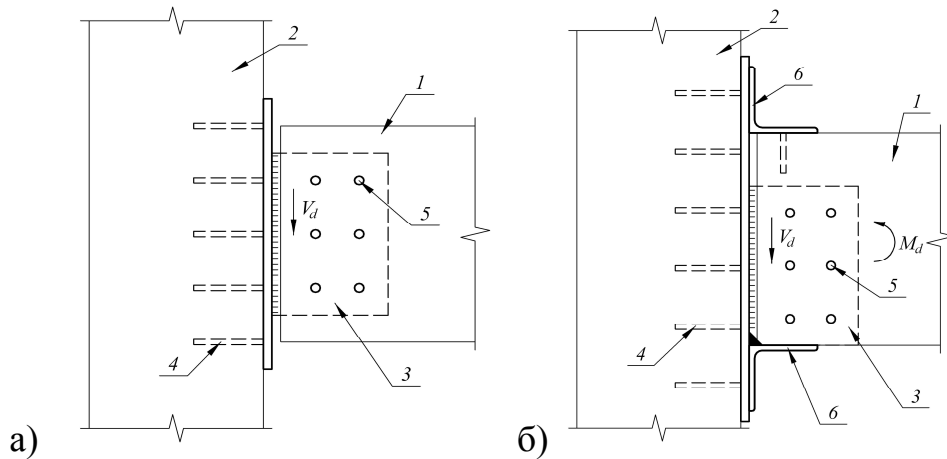


Рисунок 20 – Загальний вигляд конструкції вузлів сполучення клеєної дерев'яної балки та колони: а) шарнірний; б) жорсткий; 1 – балка; 2 – колона; 3-Т-подібний зварний елемент; 4, 5 – болти; 6 - кутники

Жорсткий вузол з'єднання балки та колони (рис. 20, б), окрім опорної реакції, сприймає і передає на колону згинальний момент. В запропонованому конструктивному рішенні опорний момент сприймається двома кутиками, які закріплюються до балки та приварюються до вертикальної пластини. При визначенні несучої здатності жорсткого з'єднання окремо на дію опорної реакції за умовою (35) перевіряють кріплення вертикальної пластини Т-подібного елемента через болти до колони та балки, та на згинальний момент - кріплення кутиків до балки та деревину в зоні болтового з'єднання за наступною формулою:

$$M_d \leq \min(M_t; M_{sh}), \quad (36)$$

де M_d – розрахунковий згинальний момент на опорі; M_t – згинальний момент, який може прийняти болтове з'єднання в дерев'яному елементі; M_{sh} - згинальний момент, який може прийняти деревина в зоні болтового з'єднання.

В шостому розділі приведено теоретичні основи, принципи та систему критеріїв оцінки екологічного впливу будівельного об'єкту протягом життєвого циклу та за його межами. З урахуванням вимог стандарту EN 15978 запропоновано методикку оцінки вуглецевого сліду будівельного об'єкту протягом його життєвого циклу, що відповідає сучасним вимогам щодо стійкого розвитку та циркулярної економіки. Для груп життєвого циклу запропонована модульна система, що враховує всі стадії, розділені на окремі інформаційні групи (А, В, С та D). Викиди вуглецю оцінюються на стадіях за відповідними підгрупами: видобутку, транспортування та переробки сировини (А1-А3), процесу будівництва (А4 та А5), експлуатації, обслуговування та ремонту (В1-В7), а також ліквідації та утилізації (С1-С4). Окрім цього, враховуються можливі переваги пов'язані з переробкою відходів та рециклінгом компонентів та матеріалів будівлі (D).

Вуглецевий слід будівлі від викидів протягом всього життєвого циклу визначається за формулою:

$$CF = CF_{A1-A3} + CF_{A4-A5} + CF_{B1-B7} + CF_{C1-C4} - CF_D, \quad (37)$$

де CF - розрахункова кількість викидів життєвого циклу будівлі; CF_{A1-A3} – розрахункова кількість викидів доексплуатаційної стадії; CF_{A4-A5} – розрахункова кількість викидів стадії будівництва; CF_{B1-B7} – розрахункова кількість викидів стадії експлуатації; CF_{C1-C4} – розрахункова кількість викидів стадії завершення життєвого циклу; CF_D – розрахункова кількість викидів за межами життєвого циклу.

Проведена оцінка ефективності застосування багатоповерхових деревозалізобетонних гібридних будівель за критерієм зменшення вуглецевого сліду. При цьому було розглянуто два альтернативні варіанти 15-ти поверхової будівлі: з залізобетонним каркасом та з гібридним каркасом (колони та балки з клеєної деревини та залізобетонне ядро жорсткості).

Результати оцінки вуглецевого сліду багатоповерхових будівель із залізобетонним (варіант 1) та гібридним каркасом (варіант 2) приведені на рис. 21.

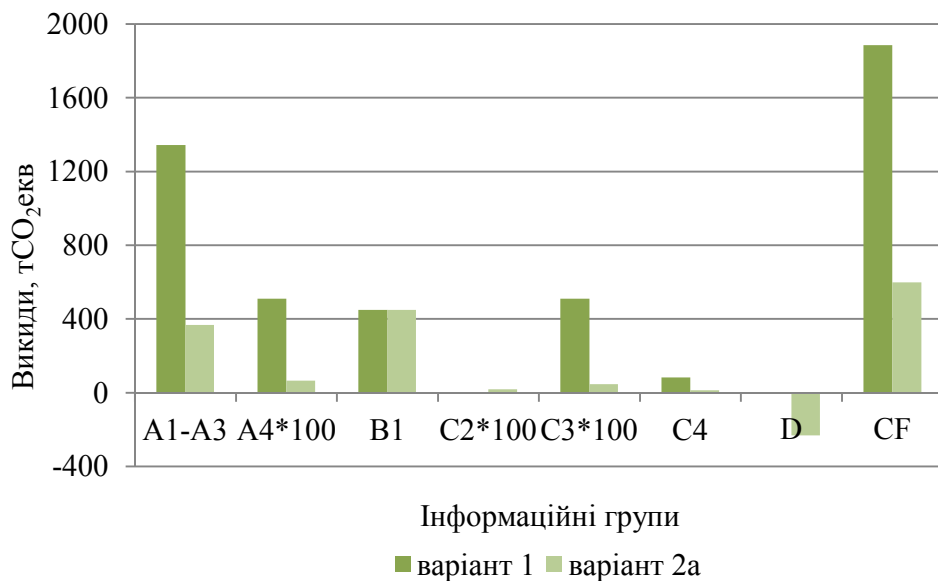


Рисунок 21 – Діаграма викидів вуглецю за інформаційними групами життєвого циклу та сумарних (CF)

Сумарні викиди вуглекислого газу гібридної деревозалізобетонної будівлі становили 598 тCO₂екв, тоді як будівлі із залізобетонним каркасом – 1886 тCO₂екв. Встановлено, що викиди при виробництві матеріалів та виробів для зведення гібридної будівлі зменшуються в 3.7 рази, при транспортуванні до будівельного майданчику – в 7.8 разів, при транспортуванні та захороненні будівельних відходів після ліквідації будівлі – в 10.8 та 6.6 разів, відповідно. Для розглянутих варіантів будівель застосування гібридної системи з використанням дерев'яних несучих конструкцій сприяє зменшенню вуглецевого сліду більше ніж в три рази.

ВИСНОВКИ

У дисертації виконано теоретичне узагальнення і запропоновано нове вирішення важливої науково-практичної проблеми, яка полягає в дослідженні та розробці наукових та методологічних положень, методів розрахунку та проектування гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель з урахуванням діаграм деформування, повзучості матеріалів та показників екологічного впливу на навколишнє середовище протягом життєвого циклу.

Виконані дослідження дозволяють зробити такі основні висновки:

1. Запропоновано конструктивні рішення гібридного дерево-залізобетонного ребристого перекриття, які забезпечують створення протипожежних відсіків в межах окремого поверху, можливість вільного планування приміщень та максимально можливе використання деревини та інженерних виробів на її основі з точки зору відповідності критеріям стійкого розвитку. Розроблені конструктивні рішення основних вузлів з'єднань несучих конструкцій гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель, а саме стик колон по висоті; стик колон з фундаментом; сполучення балок та колон; сполучення дерев'яних балок та залізобетонних конструкцій; з'єднання вертикальних в'язей з колонами та балками, які полегшують виконання монтажних робіт, підвищують геометричну точність з'єднання елементів та забезпечують вогнестійкість з'єднувальних елементів.

2. Встановлені закономірності зміни параметрів НДС конструкцій гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель в залежності від конструктивної схеми. Вперше на прикладі будівлі-прототипу обґрунтовано вибір конструктивної схеми та спосіб забезпечення просторової жорсткості гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель висотою до 20-ти поверхів включно.

3. Досліджено вплив повзучості матеріалів (деревини та бетону) на напружено-деформований стан гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель, який полягає в істотному (1.8-3.7 разів) збільшенні вертикальних переміщень несучих конструкцій. Значна різниця у деформаційних характеристиках та повзучості обумовлює появу нерівномірних вертикальних переміщень. Запропоновано метод компенсації нерівномірних вертикальних переміщень несучих конструкцій гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель, який полягає у корекції розмірів поперечного перерізу вертикальних елементів.

4. Сформульовано рекомендації щодо розрахунку гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель, які включають вимоги до фізичної моделі будівлі, призначення характеристик матеріалів, методи визначення параметрів напружено-деформованого стану, моделювання з'єднань, а також необхідні перевірки за результатами розрахунку. Особливістю розрахунків гібридних деревозалізобетонних будівель є необхідність перевірки за нерівномірними вертикальними переміщеннями.

5. Проведено комплекс експериментальних досліджень матеріалів та виробів для застосування в гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівлях. Отримані дані щодо фізико-механічних характеристик клеєної деревини, несучої здатності та деформативності натурних балок, болтових з'єднань та з'єднань на металевих пластинах.

6. Удосконалено методикау експериментального дослідження міцності та деформативності деревини в зоні взаємодії з металевим нагелем шляхом поєднання стандартних методик з методами оптичної фізики (лазерної голографічної інтерферометрії). Отримано нові дані щодо характеру взаємодії металевого з'єднувального елемента з деревиною, криві залежностей «навантаження-переміщення» та міцність деревини сосни на вдавлювання.

7. Розроблено чисельно-аналітичний метод оцінки напружено-деформованого стану деревозалізобетонних конструкцій, що працюють на згин, з урахуванням діаграм деформування матеріалів і з'єднань та ступеня спільної роботи елементів конструкції.

8. Запропонована теоретична залежність для визначення модуля ковзання з'єднання під дією навантаження. З використанням отриманої залежності та відомих розрахункових методик розроблено алгоритм розрахунку деревозалізобетонних конструкцій, що працюють на згин, з урахуванням діаграми деформування з'єднання і армування розтягнутої зони бетонного елемента. Встановлено, що при навантаженнях, які відповідають пластичним деформаціям з'єднання, напруження згідно лінійно-пружної моделі виявляються заниженими в порівнянні із запропонованою методикою. Несуча здатність плити, визначена з урахуванням армування, забезпечує сприйняття розрахункового згинального моменту до навантажень, що викликають руйнування дерев'яної балки, при дотриманні умови раціонального використання міцнісних властивостей стиснутого бетону і розтягнутої арматури.

9. Удосконалено метод моделювання напружено-деформованого стану з'єднань з металевими зв'язками (нагелями, болтами тощо) шляхом розбиття масиву деревини на дві області – глобальну з нормованими значеннями фізико-механічних властивостей деревини та локальну в зоні зминання приведеними характеристиками. Виконано тестове моделювання зразків деревини, випробуваних на вдавнення болта з реєстрацією деформацій поверхні, та болтового з'єднання на сталевих пластинах в ПК ANSYS 14.5. Запропонований метод дозволяє більш достовірно моделювати характер деформування з'єднання під навантаженням.

10. Удосконалена методика розрахунку сполучення дерев'яної балки та колони шляхом дискретизації вузла на окремі компоненти, яка оснований на вимогах і положеннях чинних стандартів і дозволяє виконувати проектування вузлів з використанням нормованих характеристик.

11. На основі вимог EN 15978 запропонована методологія оцінки вуглецевого сліду, що враховує всі стадії життєвого циклу, а також можливість рециклінгу складових елементів та матеріалів після ліквідації будівлі. Проведена оцінка вуглецевого сліду та встановлено, що застосування гібридних деревозалізобетонних будівель сприяє зменшенню вуглецевого сліду більше ніж в три рази. При цьому завдяки придатності деревини до переробки з метою повторного використання, а також поглинання вуглекислого газу з атмосфери можливе додаткове зниження вуглецевого сліду.

12. Загалом в результаті проведених досліджень розроблено загальний методологічний підхід, основні положення та принципи розрахунку і проектування конструкцій гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель з урахуванням діаграм деформування, повзучості матеріалів та обґрунтовано їх застосування з точки зору критеріїв стійкості життєвого циклу та циркулярної ресурсоефективної економіки при відповідності вимогам щодо надійності, несучої здатності та експлуатаційної придатності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації**

Праці у друкованих виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України:

1. Шехоркіна С. Е., Савицький Н. В., Никифорова Т. Д., Шляхов К. В. Многоэтажное деревянное домостроение: современные тенденции и будущие перспективы. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия «Создание высокотехнологических социэкокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития»*. Днепр, 2017. Вып. № 99. С. 153–159.
2. Шехоркіна С. Е., Савицький Н. В., Клименко В. З. Древесина как конструкционный материал в национальных и европейских нормах. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия «Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения»*. Днепр, 2017. Вып. 100. С. 131–137.
3. Шехоркіна С. Є., Кесарійський А. Г. Дослідження особливостей деформування та міцності деревини на вдавнення із застосуванням методу голографічної інтерферометрії. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпро, 2019. № 4. С. 93–99.
4. Шехоркіна С. Є., Савицький М. В., Бордун М. В. Діаграма деформування та модуль ковзання нагельних з'єднань деревобетонних конструкцій. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпро, 2020. № 2. С. 94–101.
5. Шехоркіна С. Є., Буцька О. Л., Бордун М. В., Шляхов К. В. Напружено-деформований стан гібридних дерево-залізобетонних багатоповерхових будівель з урахуванням деформацій повзучості. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпро, 2020. № 3. С. 100–108.
6. Шехоркіна С. Є., Махінько М. М., Мислицька А. О. Експериментальне дослідження фізико-механічних характеристик клеєної деревини. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2020. № 79. С. 53–62.
7. Shekhorkina S., Shliakhov K., Sopilniak A. Experimental investigation of load-bearing capacity and deflections of full-scale glued laminated timber beams. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. Odessa, 2020. Issue 2 (61). P. 5–11.
8. Шехоркіна С. Є. Експериментальне дослідження болтового з'єднання елементів з клеєної деревини на металевих пластинах. *Сучасні будівельні конструкції з металу і деревини*. Одеса, 2020. № 24. С. 134–140.
9. Шехоркіна С. Є., Нікіфорова Т. Д., Буцька О. Л. Оцінка вертикальних переміщень гібридних дерево-залізобетонних будівель. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2020. № 2 (100) С. 149–157.
10. Шехоркіна С. Є., Савицький М. В. Компенсація нерівномірних вертикальних переміщень гібридних дерево-залізобетонних багатоповерхових будівель. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпро, 2020. № 4. С. 114–118.
11. Шехоркіна С. Є., Савицький М. В., Ковтун-Горбачова Т. А.

Конструктивне рішення та методика розрахунку вузлів сполучення клеєної дерев'яної балки та колони. *Комунальне господарство міст*. Харків, 2020. № 4 (157). С. 12–17.

12. Shekhorkina S. Yev., Adil Jabbar Abbas, Nikiforova T. D. Investigation of the stress-strain state of hybrid timber-reinforced concrete multi-storey buildings. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпро, 2020. № 5. С. 176–181.

13. Shekhorkina S., Savytskyi M., Yurchenko Y., Koval O. A methodology for carbon footprint assessment of buildings. *Environmental Problems*. Lviv, 2020. Vol. 5, № 3. P. 174–178.

14. Шехоркіна С. Є. Метод оцінювання напружено-деформованого стану деревозалізобетонної конструкції складеного перерізу. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Дніпро, 2020. № 6. С. 156–161.

15. Shekhorkina S. Yev. Assessment of the carbon footprint of multi-storey hybrid timber-reinforced concrete building. *Науковий вісник будівництва*. Харків, 2020. № 3 (101). С. 121–127.

Праці у наукових виданнях інших держав та фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

16. Shekhorkina S., Savytskyi M., Kesariyskyi A., Kondrashchenko V., Dukat S. Investigation of nailed timber connections using the laser interferometry method. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2018. Vol. 26 (4). P. 32–38. URL: <https://doi.org/10.2478/sjce-2018-0026/> (*Web of Science*).

17. Shekhorkina S., Butska O., Nikiforova T., Makhinko M. Investigating the strength and deformability of the node that connects precast slabs and monolithic joists in a flat precast-monolithic flooring slab. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4, № 1 (100). P. 14–25. (*SCOPUS*, *квартиль Q2*).

18. Shekhorkina S., Kesariisky A., Makhinko M., Nikiforova T., Savytskyi O. Experimental Investigation and FEM Modeling of Glued Timber Connections with Slotted-In Steel Plates. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2019. Vol. 27 (4). P. 18–23. URL: <https://doi.org/10.2478/sjce-2019-0027> (*Web of Science*).

19. Shekhorkina S., Savytskyi M., Nikiforova T., Shliakhov K., Myslytska A. Design of the composite timber-reinforced concrete bending elements considering nonlinear behaviour of the connection. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 5 (107). P. 14–21. (*SCOPUS*, *квартиль Q3*).

Розділи в колективних монографіях:

20. Шехоркіна С. Є., Никифорова Т. Д., Бабенко М. М. Разработка метода оценки экологической эффективности экопоселения и жилого дома для системы экологической сертификации. *Методология создания устойчивых экопоселений в Украине* : коллективная монография / под. общ. ред. Д.т.н., проф. Н.В. Савицкого. Дніпро, 2017. С. 70–81.

21. Шехоркіна С. Є. Теоретичне та експериментальне обґрунтування несучих конструкцій екологічної будівлі «Потрійний нуль». *Зелені будівлі для сталого розвитку житлового будівництва* : монографія / М. М. Бабенко, М. В. Савицький та ін. Дніпро : ФОП Удовиченко О.М., 2018. 99 с.

Наукові праці, які додатково відображають результати дисертації:

22. Шехоркіна С. Є., Савицький М. В., Стоянов В. В., Бабенко М. М. Проектування дерев'яних конструкцій за Єврокодами та національними додатками України. Дніпро : ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», ТОВ «Роял Принт», 2017. 147 с.

23. ДСТУ-Н Б EN 1995-1-1:2010 «Єврокод 5. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1995-1-1:2004, IDT)». Зміна №1 / Савицький М. (науковий керівник), Шехоркіна С. (відповідальний виконавець). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=56365.

24. Shekhorkina S., Babenko M., Bordun M., Zinkevych O. The concept of eco-building «TRIPLE ZERO». *Sustainable housing and human settlement : monograph / SHEE «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Slovak University of Technology in Bratislava, Dnipro, Bratislava. 2018. P. 61–67.*

25. Inspiring materials for triple zero buildings design: monograph / S. Y. Shekhorkina, M. M. Babenko, M. V. Savytskyi et. al. Dnipro : Private Enterprise Udovichenko O.M. 2019. p. 128.

26. Проектування енергоефективних екобудівель. Практичний гід: монографія / М. В. Савицький, М. М. Бабенко, С. Є. Шехоркіна та ін. Дніпро : ФОП Обласов В.О., 2019. 97с.

27. Innovative Sustainable Engineering Practices / M. Savytskyi, M. Babenko, S. Shekhorkina, ets. Dnipro: Private Enterprise Oblassov V. A., 2020. 133 p.

28. Green technologies and 3D-printing for a Triple-zero concept in construction : monograph / M. Savytskyi, M. Babenko, S. Shekhorkina, ets. Dnipro : Private Enterprise Oblassov V. A., 2020. 156 p.

29. Shekhorkina S., Bondarenko O., Andriienko I., Karmalit I. Concept of reconstruction of Obchodna street in Bratislava. *InStep. Innovation Sustainable Engineering Practices. Sketch Album. Slovak University of Technology, Bratislava, 2019. P. 5–8. URL: https://issuu.com/instep_project/docs/instep_monograf_fin.*

30. Архітектурно-конструктивно-технологічна система 3Д-друку будівельних об'єктів: колективна монографія / М. Савицький, Ш. Айріх, І. З. Халаф, С. Шехоркіна та ін.; за заг. ред. М. Савицького. Дніпро : ФОП Удовиченко О.М., 2019. 233 с.

31. Шехоркіна С. Е. Жилое здание на плавучей платформе с якорной системой из железобетонных стоек. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия : Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития. Днепропетровск, 2015. Вып. 81. С. 229-234.*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

32. Шехоркіна С. Є., Бердніков М. Р. Конструктивні рішення вузлів сполучень несучих та огорожувальних конструкцій енергоефективних будівель. *Проблеми будівництва, водокористування та екології* : матеріали Всеукраїнської 79-ї науково-практичної конференції студентів та молодих вчених, м. Дніпро, Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, 2019. С. 66–67.

33. Шехоркіна С. Є., Савицький М. В., Зезюков Д. М., Буцька О. Л.,

Бердніков М. Р. Дослідження напружено-деформованого стану гібридних дерево-залізобетонних багатоповерхових будівель. *Актуальні проблеми інженерної механіки* : тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції, 12-15 травня 2020 р., Одеса, ОДАБА, 2020. С. 378–381.

34. Шехоркіна С. Є., Савицький М. В., Юрченко Є. Л., Коваль О. О. Аналіз параметрів екологічного впливу будівництва шляхом оцінки вуглецевого сліду будівель. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування* : матеріали 6-го Міжнародного конгресу, 23-25 вересня 2020 р., Львів, Західно-Український Консалтинг Центр (ЗУКЦ), ТзОВ, 2020. С. 27.

35. Shekhorkina S., Yurchenko Y., Koval O., Kolokhov O. Assessment of the carbon footprint of multi-storey hybrid timber-concrete building. *Innovative Technologies in Construction, Civil Engineering and Architecture* : The Book of Abstracts of the 18th International Scientific and Practical Conference, November 26, 2020, Dnipro, SHEI PSACEA, 2020. P. 40-41.

АНОТАЦІЯ

Шехоркіна С.Є. **Наукові основи і методи розрахунку гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» (19 – Архітектура та будівництво). – Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2020.

Дисертаційна робота присвячена розв’язанню актуальної науково-практичної проблеми розрахунку та проектування гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель з урахуванням діаграм деформування, повзучості матеріалів та показників екологічного впливу на навколишнє середовище протягом життєвого циклу.

Запропоновані та досліджені конструктивні системи багатоповерхових будівель гібридної конструкції, обґрунтовано способи забезпечення просторової жорсткості будівель висотою до 20-ти поверхів включно. Проведено комплекс експериментальних досліджень матеріалів та виробів для застосування в багатоповерхових гібридних будівлях. Отримані дані щодо фізико-механічних характеристик клеєної деревини, несучої здатності та деформативності натурних балок, болтових з’єднань та з’єднань на металевих пластинах. Запропоновано чисельно-аналітичний метод оцінки напружено-деформованого стану (НДС) згинальних деревозалізобетонних елементів з урахуванням нелінійного характеру роботи з’єднання. Удосконалено метод моделювання НДС нагельних з’єднань дерев’яних конструкцій. Розроблено теоретичні основи та проведено оцінку вуглецевого сліду багатоповерхових гібридних будівель протягом життєвого циклу.

Ключові слова: гібридна деревозалізобетонна багатоповерхова будівля, конструктивна система, з’єднання, напружено-деформований стан, переміщення, деревозалізобетонне перекриття, вуглецевий слід.

SUMMARY

Shekhorkina S. Yev. Scientific bases and methods of calculation of hybrid timber-reinforced multi-storey buildings. – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.23.01 «Building constructions, buildings and structures» (19 – Architecture and Civil Engineering). – State higher educational establishment «Prydniprovskya State Academy of Civil Engineering and Architecture» of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2020.

The thesis is devoted to the solution of the actual scientific and practical problem of calculation and design of hybrid timber-reinforced concrete multi - storey buildings taking into account the deformation diagrams, creep of the materials and the parameters of the ecological impact on the environment during the life cycle as well as the demands of reliability, load bearing capacity and serviceability.

The analysis of researches and projects in the field of multi-storey construction using timber structures showed that the use of wood is a promising direction in the context of sustainable development and circular economy. Today there is a limited number of theoretical and experimental studies of joint work of timber and reinforced concrete load-bearing structures in the spatial system of multi-storey buildings, their calculation and design as well as a lack of integrated standards for the assessment of harmful emissions of the building.

The classification of structural systems of hybrid timber-reinforced concrete multi-storey buildings on the basis of the nature and method of distribution of load-bearing functions between elements and the material of the vertical load-bearing structures, as well as structural solutions of prefabricated monolithic and prefabricated timber-reinforced concrete floors, typical joints of load-bearing structures.

The stress-strain parameters of hybrid timber-reinforced concrete multi-storey buildings depending on the type of structural system are established. Using the prototype building, the choice of structural scheme and method of ensuring the spatial rigidity of hybrid reinforced concrete multi-storey buildings up to 20 floors are substantiated. The following systems were considered: frame, combined frame with stiffness diaphragms and rigidity core, combined frame with rigidity core and outriggers at different levels. The method of providing spatial rigidity taking into account the dependences of "stress-strain" and creep properties of materials was proposed.

To consider the creep of the concrete the Eurocode EN 1992-1-1 model was used as well as for timber – the elastic-viscous-plastic model by T. Toratti. The modeling results taking into account the creep deformation have shown that the rheological properties have significant influence of the vertical displacement of the frame elements. During 50 years the vertical displacement obtained considering creep are increasing by several times in comparison with idealized elastic model.

A significant difference in the deformation characteristics and creep causes the appearance of nonuniform vertical displacements, which causes the skew of the floor cells and the appearance of the additional tensile longitudinal forces in the floor beams. A method for compensating for nonuniform vertical displacements of load-bearing structures of hybrid timber-reinforced concrete multi-storey buildings was proposed, which consists in correcting the cross-sectional dimensions of vertical elements.

Based on the results obtained, the recommendations for the calculation of hybrid timber-reinforced concrete multi-storey buildings are formulated, which include the requirements for the physical model of the building, assignment of material characteristics, methods for determining of the stress-strain state parameters, joints modeling and necessary checks according to the calculation results.

The complex of experimental studies of materials and products for use in multi-storey buildings of the hybrid system is carried out. The data on physical and mechanical characteristics of glued timber, load-bearing capacity and deformability of real-scale beams, dowelled joints and joints on metal toothed plates were obtained.

To study the strength and deformation characteristics of timber embedment strength, a method was proposed and an experimental study was performed using the methods of optical physics (laser holographic interferometry).

Experimental studies of full-scale bolted joints on metal plates on tension parallel to the grain, as well as of connections of timber elements on metal toothed plates for tensile and bending were performed. An empirical model is proposed to describe the "load-displacement" diagram of the connection on metal toothed plates (MTP) depending on the direction of the fibers to take into account the nonlinear behaviour of the connection on mechanical connections when calculating hybrid structures.

A numerical-analytical method for estimating the stress-strain state and an engineering method for calculating bending timber-reinforced concrete elements taking into account the nonlinear nature of the joint behaviour and the effect of reinforcement on the load-bearing capacity was proposed. Considering the design features of reinforced concrete floors (slab and concrete cover thickness) the analysis of bearing capacity taking into account the reinforcement was performed.

The method of modeling the stress-strain state of joints of timber structures with mechanical connections was proposed by dividing the timber massive into two areas - global with normalized values of physical and mechanical properties of timber and local in the embedment area with the reduced characteristics.

The criteria of bearing capacity are formulated and the engineering technique of calculation of joints of glued wooden beam and column is proposed.

Theoretical bases, principles and system of criteria for assessment the environmental impact of a building asset during the life cycle and beyond were given. According to the EN 15978, a method for estimating the carbon footprint of a building during its life cycle was proposed.

The results of the conducted research are the development of a general methodological approach, basic principles and methods of calculation and design of hybrid timber-reinforced concrete multi-storey buildings, considering the deformation diagrams, creep of the materials and substantiation of their application in terms of life cycle sustainability and circular resource efficient economy criteria as well as in accordance with the demands on reliability, load-bearing capacity and serviceability.

Keywords: hybrid timber-reinforced concrete multi-storey building, structural system, connection, stress-strain state, displacement, timber-reinforced concrete floor, carbon footprint.