Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Центр заочної та дистанційної освіти
Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва

«Допустити до захисту»
зав. кафедри БДМБ
д-р техн. наук, професор
_____ В. Яцун
"____" _____ 2026 р.

Кваліфікаційна магістерська робота

на тему:

Діагностика та оцінка технічного стану малоповерхових будівель із дерев'яними конструкціями за критеріями біологічної деструкції

Керівник кваліфікаційної
магістерської роботи, доцент
_____ Дарієнко В.В.
"____" _____ 2026 р.

Виконав студент гр. БІ-25мз
спеціальності
G19 Будівництво та цивільна
інженерія
_____ Сергєєв В.М.
"____" _____ 2026 р.

Кропивницький – 2026 рік

Підписано КЕП
Центральноукраїнський національний технічний університет
СЕРГЄЄВ ВІТАЛІЙ МИКОЛАЙОВИЧ
Сертифікат: 5E984D526F82F38F04000000335D1D01C4291007
Дійсний з 08.01.2026 15:19:24 по 09.01.2027 01:59:59

Центральноукраїнський національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення *ЦЗДО*

Кафедра, циклова комісія *Будівельні, дорожні машини і будівництво*

Освітньо-кваліфікаційний рівень *магістр*

(шифр і назва)

Спеціальність *G19 Будівництво та цивільна інженерія*

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри БДМБ,

д.т.н., проф. Яцун В.В.

_____

“____” _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сергєєву Віталію Миколайовичу

(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) *Діагностика та оцінка технічного стану малоповерхових будівель із дерев'яними конструкціями за критеріями біологічної деструкції*

керівник проекту (роботи) *Дарієнко В.В., к.т.н., доцент*

(прізвище, ім’я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “*10*” *08* 2026 року № *25-13*

2. Строк подання студентом проекту (роботи) *25.11.2027 р.*

3. Вихідні дані до проекту (роботи): *двоповерховий житловий будинок 1958 р. побудови з цегляними стінами та дерев'яними перекриттями, кроквяною системою, підлогами й сходами (м. Кропивницький); кліматичні дані ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010; опубліковані результати досліджень біодеструкції та неруйнівного контролю деревини; чинні ДБН і ДСТУ.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Стан проблеми біологічної деструкції дерев'яних конструкцій; 2. Нормативна база та кліматичні умови м. Кропивницького; 3. Об'єкт обстеження, методика та критерії оцінки біодеструкції; 4. Інструментальна діагностика та оцінка залишкової несучої здатності; 5. Прогнозування динаміки біоруйнування; 6. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу

Мультимедійна презентація (22 слайди), що ілюструє методику та результати досліджень

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	**Прізвище, ініціали та посада консультанта**	**Завдання видав (підпис, дата)**	**Завдання прийняв (підпис, дата)**
Розділи 1–5 (науково-дослідні)	доцент Дарієнко В.В.		
Охорона праці	доцент Дарієнко В.В.		

7. Дата видачі завдання *01.09.2026 р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	**Назва етапів проекту (роботи)**	**Строк виконання етапів**	**Примітка**
1	Огляд літератури та нормативної бази (розділи 1, 2)	01.09–25.09	
2	Програма обстеження, критерії біодеструкції (розділ 3)	26.09–15.10	
3	Теплотехнічні розрахунки, залишкова несуча здатність балок (розділ 4)	16.10–05.11	
4	Прогнозна модель, заходи з відновлення (розділ 5)	06.11–10.11	
5	Охорона праці (розділ 6)	10.11–20.11	
6	Оформлення записки й презентації, перевірка на академічний плагіат	20.11–25.11	

Студент _____ *Сергєєв В.М.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ *Дарієнко В.В.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кількість аркушів	Примітка
				Документація загальна		
				Знову розроблена		
А4				Титульний аркуш	1	
А4				Завдання	2	
А4				Анотація	1	
А4				Abstract	1	
А4			КМР 256-19 ПЗ	Пояснювальна записка	69	
				Зміст	2	
				Вступ	3	
				Розділ 1	12	
				Розділ 2	7	
				Розділ 3	9	
				Розділ 4	10	
				Розділ 5	9	
				Розділ 6. Охорона праці	8	
				Загальні висновки	2	
				General conclusions	2	
				Список використаних джерел	5	
А4			КМР 256-19 ІМ	Ілюстраційні матеріали	22	слайди

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КМР 256-19 ВД			
Розробив		Сергєєв В.М.			Діагностика та оцінка технічного стану малоповерхових будівель із дерев'яними конструкціями за критеріями біодеструкції Відомість кваліфікаційної магістерської роботи	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив		Дарієнко В.В.				М	1	1
Реценз.						ЦНТУ гр. БІ-25мз		
Н. контр.		Дарієнко В.В.						
Затвердив		Яцун В.В.						

АНОТАЦІЯ

Сергєєв В. М. Діагностика та оцінка технічного стану малоповерхових будівель із дерев'яними конструкціями за критеріями біологічної деструкції. – Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю G19 «Будівництво та цивільна інженерія». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026.

Робота присвячена розробленню методичного підходу до діагностики та кількісної оцінки технічного стану дерев'яних конструкцій малоповерхових будівель за критеріями біологічної деструкції. Проаналізовано механізми ураження деревини грибами й комахами та сучасні методи діагностики, зокрема резистографію, звукову томографію, інфрачервону термографію й моніторинг вологості. Систематизовано чинну нормативну базу, обчислено кліматичний індекс загнивання Шеффера для м. Кропивницького (20,6) і оцінено його чутливість до кліматичних змін. Розроблено програму обстеження й систему з п'яти критеріїв з інтегральним показником, пов'язаним із категоріями технічного стану за ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Теплотехнічним розрахунком визначено залежність вологості інверсії температурної аномалії від втрати густини деревини та умови тепловізійного обстеження. Розраховано залишкову несучу здатність балки перекриття залежно від глибини гнилі. Статистичним моделюванням оцінено точність логістичної моделі біоруйнування та виконано прогноз для лаг підлоги. Розроблено заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час обстеження.

Пояснювальна записка містить 69 сторінок, 23 рисунки, 19 таблиць, 40 джерел.

Ключові слова: ДЕРЕВ'ЯНІ КОНСТРУКЦІЇ, БІОЛОГІЧНА ДЕСТРУКЦІЯ, ТЕХНІЧНИЙ СТАН, ОБСТЕЖЕННЯ, РЕЗИСТОГРАФІЯ, ІНФРАЧЕРВОНА ТЕРМОГРАФІЯ, ЛОГІСТИЧНА МОДЕЛЬ, ІНДЕКС ШЕФФЕРА, ОХОРОНА ПРАЦІ.

ABSTRACT

Serhieiev V. M. Diagnostics and assessment of the technical condition of low-rise buildings with timber structures by the criteria of biological deterioration. – Master's qualification thesis, specialty G19 "Construction and Civil Engineering". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

The thesis develops a method for diagnosing and quantitatively assessing the technical condition of timber structures in low-rise buildings by biological deterioration criteria. The decay mechanisms caused by fungi and insects and modern diagnostic methods, including resistance drilling, sonic tomography, infrared thermography and moisture monitoring, are analysed. The current Ukrainian codes are systematised, the Scheffer decay climate index for Kropyvnytskyi (20.6) is calculated and its sensitivity to climate change is assessed. An inspection programme and a system of five criteria with an integral index linked to the condition categories of DSTU-N B V.1.2-18:2016 are proposed. Heat-transfer analysis gives the dependence of the anomaly inversion moisture content on the density loss of decayed wood and the conditions for infrared surveys. The residual load-bearing capacity of a floor beam is calculated as a function of decay depth. Monte Carlo simulation is used to assess the accuracy of the logistic decay model, and a forecast for the floor joists is made. Occupational safety and emergency measures for building inspection are developed.

The explanatory note contains 69 pages, 23 figures, 19 tables and 40 references.

Keywords: TIMBER STRUCTURES, BIODETERIORATION, TECHNICAL CONDITION, BUILDING INSPECTION, RESISTANCE DRILLING, INFRARED THERMOGRAPHY, LOGISTIC MODEL, SCHEFFER INDEX, OCCUPATIONAL SAFETY.

ЗМІСТ

ВСТУП 3
Розділ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ БІОЛОГІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ 6
1.1 Деревина як конструкційний матеріал і чинники її біологічного ураження 6
1.2 Умови експлуатації та класи використання деревини 8
1.3 Типові зони біоураження в малоповерхових будівлях 9
1.4 Методи виявлення біологічної деструкції деревини 11
1.5 Підходи до прогнозування динаміки біоруйнування 15
1.6 Висновки до розділу 1 16
Розділ 2 НОРМАТИВНА БАЗА ТА КЛІМАТИЧНІ УМОВИ М. КРОПИВНИЦЬКОГО 18
2.1 Чинні нормативні документи у сфері обстеження й довговічності дерев'яних конструкцій 18
2.2 Кліматичні умови м. Кропивницького 20
2.3 Кількісна оцінка кліматичної небезпеки загнивання за індексом Шеффера 21
2.4 Висновки до розділу 2 24
Розділ 3 ОБ'ЄКТ ОБСТЕЖЕННЯ, МЕТОДИКА ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ БІОЛОГІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ 25
3.1 Характеристика об'єкта обстеження 25
3.2 Програма обстеження 26
3.3 Система критеріїв і інтегральний показник біологічної деструкції 27
3.4 Оцінка фізичного зносу будинку 30
3.5 Висновки до розділу 3 32

Розділ 4 ІНСТРУМЕНТАЛЬНА ДІАГНОСТИКА ТА ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОЇ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ 34
4.1 Фізичні основи інфрачервоної діагностики біодеструкції 34
4.2 Теплотехнічне обґрунтування умов тепловізійного обстеження 36
4.3 Точкова інструментальна перевірка 38
4.4 Залишкова несуча здатність балки перекриття, ураженої гниллю 39
4.5 Висновки до розділу 4 42
Розділ 5 ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ БІОРУЙНУВАННЯ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ 44
5.1 Логістична модель накопичення біологічних пошкоджень 44
5.2 Точність прогнозу залежно від кількості обстежень 45
5.3 Вплив клімату й умов експлуатації на параметр інтенсивності 47
5.4 Прогноз стану лаг підлоги об'єкта 48
5.5 Заходи з відновлення та захисту дерев'яних конструкцій 50
5.6 Висновки до розділу 5 51
Розділ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ 53
6.1 Загальні положення 53
6.2 Небезпечні та шкідливі виробничі чинники 53
6.3 Заходи безпеки під час виконання робіт 54
6.4 Розрахунок провітрювання підпілля та освітлення робочого місця 55
6.5 Безпека в надзвичайних ситуаціях 59
6.6 Висновки до розділу 6 59
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 61
GENERAL CONCLUSIONS 63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 65

ВСТУП

Актуальність теми. Значну частину житлового фонду малих і середніх міст України становлять малоповерхові будинки 1920–1960-х років, у яких цегляні або шлакоблочні стіни поєднано з дерев'яними перекриттями, кроквяними системами, підлогами по лагах і сходами. До цієї ж групи належить садибна забудова приватного сектора з дерев'яними та дерев'яно-каркасними стінами. У м. Кропивницькому такі будинки трапляються як в історичному центрі, так і в районах повоєнної забудови. Більшість із них експлуатується 60–100 років, а планові капітальні ремонти здебільшого не виконувалися з 1990-х років.

Строк служби дерев'яних елементів у таких будівлях обмежує насамперед не механічне зношення, а біологічна деструкція – руйнування деревини дереворуйнівними грибами й комахами-ксилофагами. Процес розвивається приховано: у місцях спирання балок на стіни, у підпіллях, під покрівлею, за обшивкою та штукатуркою. Зовнішні ознаки (прогини, тріщини в стелі, хиткість підлоги) з'являються тоді, коли втрата перерізу вже значна. Наслідком є аварійні обвалення перекриттів і невиправдано великі обсяги заміни конструкцій, коли пошкодження виявляють запізно.

Чинна в Україні настанова з обстеження будівель ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 [1] встановлює загальні категорії технічного стану, але не містить кількісних критеріїв саме для біологічної деструкції деревини, не враховує кліматичну небезпеку загнивання в регіоні й не дає інструменту прогнозування розвитку ураження. Європейські настанови з оцінки дерев'яних конструкцій [2, 3] докладно описують процедуру обстеження, проте орієнтовані на пам'ятки й великопрольотні споруди. Отже, потрібен методичний підхід, що пов'язує результати інструментального обстеження рядового житлового будинку з категорією технічного стану та прогнозом. Це й зумовлює актуальність теми роботи.

Мета роботи – розробити методичний підхід до діагностики та кількісної оцінки технічного стану дерев'яних конструкцій малоповерхових будівель за

критеріями біологічної деструкції з урахуванням кліматичних умов м. Кропивницького та чинної нормативної бази України.

Для досягнення мети поставлено такі **завдання**:

– проаналізувати механізми біологічного ураження деревини та сучасні методи його виявлення;

– систематизувати чинні нормативні документи у сфері обстеження й довговічності дерев'яних конструкцій та кількісно оцінити кліматичну небезпеку загнивання деревини в м. Кропивницькому;

– розробити програму обстеження та систему критеріїв біологічної деструкції з інтегральним показником, пов'язаним із категоріями технічного стану;

– теплотехнічним розрахунком обґрунтувати умови застосування інфрачервоної діагностики прихованих ділянок біодеструкції;

– оцінити вплив глибини гнилі на несучу здатність і деформативність дерев'яних балок перекриття;

– дослідити властивості логістичної моделі динаміки біоруйнування, точність ідентифікації її параметрів і виконати прогноз для об'єкта;

– розробити заходи з охорони праці під час обстеження будівель.

Об'єкт дослідження – процеси біологічної деструкції деревини в несучих і огороджувальних конструкціях малоповерхових будівель, що тривало експлуатуються.

Предмет дослідження – методи діагностики біоураження, критерії оцінки технічного стану дерев'яних елементів і моделі прогнозування динаміки біоруйнування.

Методи дослідження: аналіз і узагальнення літературних джерел; порівняльний аналіз нормативних документів; кліматичний аналіз за індексом Шеффера; одновимірний розрахунок теплопередачі; розрахунок дерев'яних елементів за граничними станами (ДБН В.2.6-161:2017, ДСТУ-Н Б EN 1995-1-1:2010); метод найменших квадратів і статистичне моделювання (метод Монте-Карло); експертно-бальне оцінювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

– запропоновано інтегральний показник біологічної деструкції дерев'яного елемента, що поєднує п'ять кількісних і якісних критеріїв і відповідає категоріям технічного стану за ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016;

– показано, що вологість, за якої температурна аномалія над ураженою деревиною змінює знак, залежить від втрати густини (від 27 % при $\Delta\rho = 20$ % до 62 % при $\Delta\rho = 50$ %), і визначено «сліпу зону» тепловізійного методу для умов м. Кропивницького;

– статистичним моделюванням оцінено, як точність прогнозу за логістичною моделлю залежить від кількості повторних обстежень, що дало змогу обґрунтувати періодичність обстежень.

Практичне значення роботи полягає в тому, що програма обстеження, шкала критеріїв, таблиця-номограма залишкової несучої здатності балок і алгоритм прогнозу можуть бути використані експертними й проєктними організаціями під час обстеження старого житлового фонду, органами місцевого самоврядування при плануванні ремонтів, а також у навчальному процесі за дисциплінами з обстеження та реконструкції будівель.

Апробація результатів. Основні результати роботи представлено на міжнародній науково-технічній онлайн-конференції «Наука, інженерія та технології: сучасні виклики й перспективи» (Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, 24–25 листопада 2026 р.).

Структура роботи. Пояснювальна записка складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків українською та англійською мовами і списку використаних джерел. Загальний обсяг – 69 сторінок, у тому числі 23 рисунки, 19 таблиць; список використаних джерел містить 40 найменувань.

Розділ 1
СТАН ПРОБЛЕМИ БІОЛОГІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ

1.1 Деревина як конструкційний матеріал і чинники її біологічного ураження

Деревина хвойних порід (сосна, ялина, модрина) залишається одним із найпоширеніших матеріалів для перекриттів, дахів і підлог малоповерхових будівель завдяки високій питомій міцності, технологічності й доступності. Водночас як органічний матеріал вона є джерелом живлення для низки організмів. Клітинна стінка деревини складається приблизно з 40–50 % целюлози, 20–30 % геміцелюлоз і 25–30 % лігніну [4]. Целюлозні мікрофібрили сприймають розтяг і забезпечують міцність уздовж волокон, лігнін відповідає за жорсткість і стійкість до стиску. Тому будь-яке біологічне руйнування цих компонентів одразу позначається на механічних характеристиках.

Для розвитку дереворуйнівних грибів одночасно потрібні чотири умови: волога, сприятлива температура, кисень і доступ спор або міцелію до деревини. Нижньою межею вологості, за якої гриби можуть почати розвиток, вважають близько 20 %, оптимум для більшості видів лежить у діапазоні 30–60 %, тобто вище точки насичення волокон (ТНВ, близько 28–30 %) [4, 5]. Температурний інтервал активності – від 3–5 до 35–40 °С з оптимумом 20–30 °С. Деревина, повністю насичена водою (палі нижче рівня ґрунтових вод), практично не гниє через нестачу кисню, а повітряно-суха деревина з вологістю нижче 18–20 % також є безпечною. Отже, найбільший ризик припадає на зони змінного зволоження: контакт із ґрунтом, кладкою, конденсатом чи протіканнями. Зони вологості деревини за ступенем біологічної небезпеки показано на рисунку 1.1.

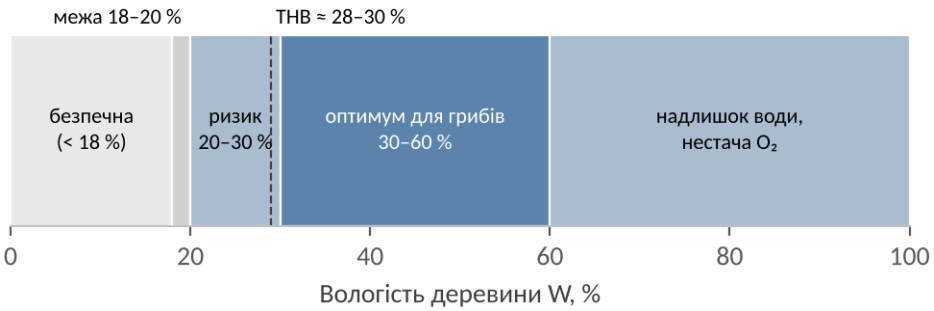

Рис. 1.1 Шкала вологості деревини та зони біологічної небезпеки (побудовано автором за даними [4, 5])

Практичний висновок із рисунка 1.1 простий: щоб зупинити гниття, достатньо усунути хоча б одну з умов, і найлегше це зробити з вологою.

Залежно від характеру руйнування розрізняють три основні типи гнилі [5]:

– бура (деструктивна) гниль – гриби руйнують переважно целюлозу й геміцелюлози, залишаючи модифікований лігнін; деревина темніє, розтріскується на призматичні шматочки і легко розтирається в порошок. Саме бура гниль найнебезпечніша для конструкцій із хвойних порід: справжній домовий гриб (Serpula lacrymans), плівчастий домовий гриб (Coniophora puteana), білий домовий гриб (Antrodia vaillantii), шпальний гриб (Gloeophyllum sepiarium);

– біла (корозійна) гниль – руйнуються всі компоненти клітинної стінки, деревина світлішає, стає волокнистою й губчастою; більш характерна для листяних порід і деревини в контакті з ґрунтом;

– м'яка гниль – спричинюється сумчастими й недосконалими грибами в постійно вологій деревині та уражує поверхневий шар на глибину кількох міліметрів.

Для діагностики принципово важливо, що бура гниль знижує міцність деревини значно раніше, ніж з'являються видимі ознаки. За узагальненням W. W. Wilcox [6], при втраті маси лише 5–10 % міцність на статичний згин зменшується на 40–70 %, а ударна в'язкість – ще більше. Тому оцінка стану «на око» систематично завищує фактичну несучу здатність уражених елементів.

Другою групою біологічних руйнівників є комахи-ксилофаги. У будівлях України найчастіше трапляються меблевий точильник (Anobium punctatum), що уражує заболонь у вологих неопалюваних приміщеннях, і будинковий вусач (Hylotrupes bajulus), личинки якого протягом кількох років вигризають заболонь крокв і балок на горищах. Ознаками ураження є круглі або овальні льотні отвори діаметром 1–2 мм (точильник) чи 5–10 мм (вусач) і борошноподібний буровий пил. Ураження комахами часто поєднується з грибним: ослаблена гниллю деревина приваблює точильників, а ходи личинок полегшують проникнення вологи.

Будова деревини визначає і природну стійкість. Ядрова деревина сосни й модрини стійкіша за заболонну, ялина має середню стійкість. Стандарт EN 350 [7] поділяє породи на п'ять класів природної довговічності: ядро сосни звичайної належить до класу 3–4 (середньо- або малостійке), ялина – до класу 4, заболонь будь-якої породи – до класу 5 (нестійка). У будівлях, зведених із серійних пиломатеріалів без відбору ядрової деревини, природний захист фактично відсутній.

1.2 Умови експлуатації та класи використання деревини

Сучасний підхід до забезпечення довговічності дерев'яних елементів ґрунтується на поняттях класу використання за EN 335 [8] і класу експлуатації за ДСТУ-Н Б EN 1995-1-1:2010 [9] і ДБН В.2.6-161:2017 [10]. Клас використання характеризує ймовірність зволоження деревини понад 20 % і, відповідно, біологічну небезпеку (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1

Класи використання деревини за EN 335 і приклади елементів малоповерхової будівлі

Клас	Умови експлуатації	Небезпека	Елементи будівлі (приклади)
1	Усередині, сухо; W < 20 % постійно	Комахи	Балки міжповерхових перекриттів в опалюваних приміщеннях, сходи

Клас	Умови експлуатації	Небезпека	Елементи будівлі (приклади)
2	Усередині або під накриттям; можливе випадкове зволоження	Гриби (епізодично), комахи	Крокви, мауерлат, обрешітка, горищне перекриття, кінці балок у зовнішніх стінах
3.1 / 3.2	Ззовні без контакту з ґрунтом; часте зволоження	Гриби, комахи	Обшивка фасадів, карнизи, вікна, ґанки, навіси
4	Контакт із ґрунтом або прісною водою	Гриби (у т. ч. м'яка гниль), комахи	Лаги на стовпчиках у підпіллі, стовпи огорож
5	Контакт із морською водою	Морські свердлильники	У будівлях регіону не трапляються

Аналіз таблиці 1.1 показує, що один і той самий елемент у різних зонах може належати до різних класів. Типовий приклад – балка міжповерхового перекриття: у прольоті вона працює в класі 1, а її кінці, замуровані в зовнішню цегляну стіну, – фактично в класі 2–3, оскільки кладка взимку промерзає, на межі деревина–кладка конденсується волога, а за поганого водовідведення стіна зволожується атмосферними опадами. Саме тому опорні ділянки балок є найчастішим місцем біодеструкції в будинках із мішаними конструкціями.

Ризик біопошкодження будівельних матеріалів залежить не лише від вологості, а й від тривалості її дії. Фінські дослідження [11] показали, що для появи плісняви на поверхні деревини критичною є тривала відносна вологість повітря близько 80 %, тоді як дереворуйнівні гриби потребують значно вологіших умов (відносна вологість понад 95 %, вологість деревини понад 25–30 %), і втрата маси починається лише після тривалого перебування в таких умовах. Цей висновок важливий для обстеження: разове вимірювання вологості характеризує лише поточний стан, тоді як причину зволоження треба встановлювати за сукупністю ознак.

1.3 Типові зони біоураження в малоповерхових будівлях

Узагальнення настанов з обстеження дерев'яних конструкцій [2–4] і досвіду обстежень житлового фонду дає змогу виділити зони, у яких біодеструкція розвивається найчастіше (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2

Зони підвищеного ризику біодеструкції та причини зволоження деревини

Конструкція / зона	Причина зволоження	Характерні прояви
Лаги й дошки підлоги 1-го поверху над підпіллям	Випаровування з ґрунту, закриті продухи, протікання трубопроводів, відсутність гідроізоляції під опорами лаг	Прогин і хиткість підлоги, запах цвілі, плівки міцелію, бура призматична гниль
Опорні кінці балок перекриттів у зовнішніх стінах	Промерзання кладки, конденсат, намокання стін через несправні водостоки	Тріщини в стелі вздовж стін, просідання підлоги біля стін, гниль на глибину 20–60 мм
Мауерлат, кінці крокв, карнизний вузол	Протікання покрівлі, відсутність вентиляції горища, конденсат під покрівлею	Темні плями, м'яка деревина при проколюванні, льотні отвори вусача
Перекриття під санвузлами й кухнями	Протікання сантехніки, порушення гідроізоляції підлоги	Плями на стелі нижнього поверху, руйнування накату й засипки
Віконні та дверні коробки	Конденсат на склі, затікання дощової води	Розшарування деревини, відпадання фарби, біологічні нальоти
Нижні вінці й обв'язки дерев'яних стін	Капілярне підсмоктування з фундаменту, сніг біля стін, висока відмостка	Гниль на висоту 0,3–0,6 м від цоколя, викривлення горизонтальних ліній
Сходи, нижні тятиви й опорні вузли	Миття підлог, контакт із бетонною підлогою підвалу	Хиткість маршу, гниль у місцях спирання

Окремим чинником є погіршення умов експлуатації внаслідок дій самих мешканців: закладання продухів підпілля для «утеплення», влаштування погребів під квартирами, підняття рівня відмостки й тротуарів під час благоустрою, заміна дерев'яних вікон на пластикові без організації припливу повітря. Кожна з цих дій підвищує вологість повітря біля дерев'яних елементів і фактично переводить їх у вищий клас використання. Розташування зон ризику на поперечному розрізі типового двоповерхового будинку показано на рисунку 1.2.

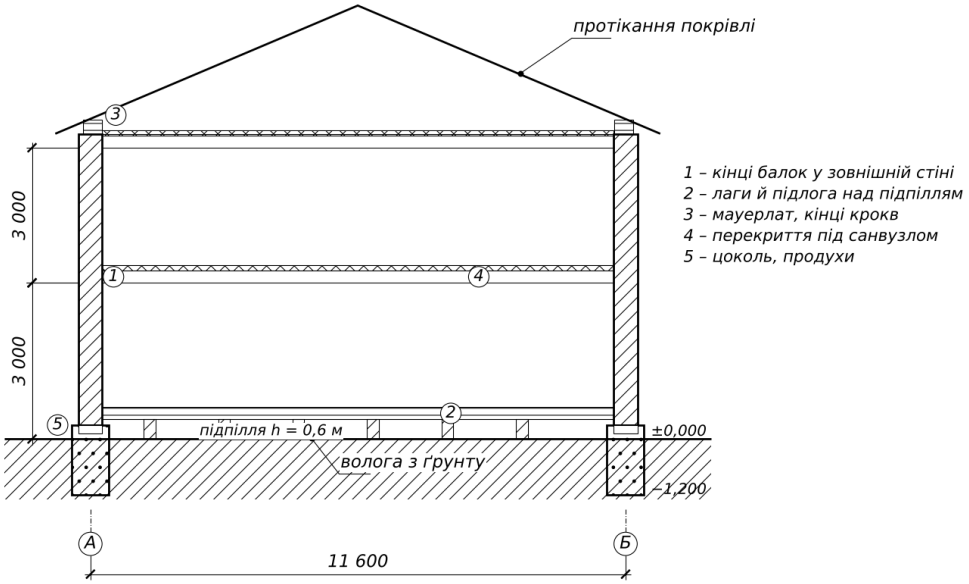

Рис. 1.2 Зони підвищеного ризику біодеструкції в будинку з цегляними стінами й дерев'яними перекриттями (схема автора)

1.4 Методи виявлення біологічної деструкції деревини

Сучасні настанови [2, 3] передбачають двофазну процедуру: попередню оцінку (вивчення документації, візуальний огляд, обміри, попередній аналіз) і детальне обстеження зон, у яких попередня оцінка виявила підвищені напруження чи ознаки пошкоджень. На детальному етапі визначають породу деревини, вологість і її градієнти, характер біологічного пошкодження й міцність. Методи діагностики можна згрупувати за ступенем втручання в конструкцію та за фізичним принципом. Нижче їх розглянуто в порядку зростання інформативності.

Візуальний огляд і простукування. Найпростіший і найпоширеніший метод. Фіксують непрямі ознаки – прогини, тріщини, розкриття швів, плями на штукатурці, міцелій чи плодові тіла, буровий пил. Простукування молотком дає глухий звук над порожнинами й гниллю. Перевага методу – швидкість і відсутність обладнання, головний недолік – суб'єктивність і нездатність виявити ураження на ранній стадії [12].

Зондування (проколювання). Шило або щуп заглиблюють у деревину зусиллям руки; легке входження на глибину понад 10 мм свідчить про

розм'якшення. Різновидом є пружинний пенетрометр Pilodyn, глибина проникнення бойка якого корелює з густиною поверхневого шару [13]. Метод дає грубу оцінку глибини ураження, але потребує доступу до поверхні.

Вологометрія. Кондуктометричні вологоміри з голчастими електродами вимірюють вологість у шарі до 20–40 мм, ємнісні – у поверхневому шарі. Вологість понад 20 % не є доказом гниття, але вказує на зону ризику, а понад 30 % у поєднанні з іншими ознаками майже завжди свідчить про активний процес. Останнім часом запропоновано уніфікувати інтерпретацію вимірів: у роботі [14] на основі огляду літератури виділено чотири класи стану деревини за вологістю – сухий (менше 12 %), помірний (12–20 %), поганий (20–25 %) і критичний (понад 25 %) – з відповідними діями з обслуговування. Порівняння цієї класифікації з умовами розвитку грибів і з критерієм K1, запропонованим у розділі 3, наведено на рисунку 1.3.

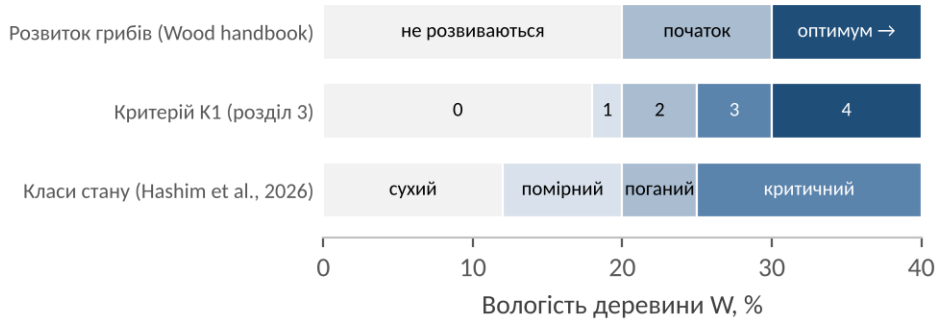

Рис. 1.3 Порівняння меж класів вологості деревини (побудовано автором за даними [4, 14])

Свердління з вимірюванням опору (резистографія). Тонке свердло діаметром 1,5–3 мм проходить крізь переріз зі сталою швидкістю, а прилад записує крутний момент чи споживану потужність. На діаграмі гниль проявляється різким падінням опору, порожнини – нульовим опором. Метод дає профіль густини по глибині й залишає отвір, який практично не послаблює переріз, тому вважається малоруйнівним і рекомендований RILEM [15]. Порівняльні випробування на деревах евкаліпта й в'яза, перевірені розпилюванням і визначенням густини, показали, що глибина здорової деревини

за резистографом збігалася з лабораторною в 85,5 і 100 % випадків, а за звичайним ручним дрилем – лише в 73 і 81 % [16] (рисунок 1.4). Автори наголошують, що правильність інтерпретації залежить від знання типового профілю опору для конкретної породи.

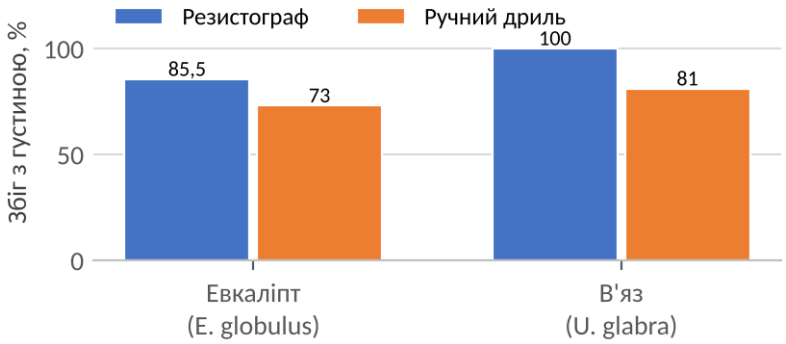

Рис. 1.4 Частка збігу глибини здорової деревини з лабораторними даними (побудовано автором за даними [16])

Практичні настанови з обстеження дерев'яних мостів [17] рекомендують свердлити переріз з обох боків, тримати свердло не ближче 20 мм від тріщин, щоб воно не «йшло» по тріщині, свердлити перпендикулярно до грані з невеликим нахилом угору для стікання води й закривати отвори антисептованими пробками. Ці вимоги враховано в програмі обстеження (розділ 3).

Ультразвукові та акустичні методи. Швидкість поширення ультразвуку вздовж волокон у здоровій деревині сосни становить 5000–6000 м/с і помітно знижується в зоні гнилі [18]. Метод хвиль напружень (stress wave) широко застосовують для оцінки стану балок і паль у США [12]. Акустична (звукова) томографія дає змогу за кількома датчиками по периметру отримати карту швидкостей у перерізі. На прикладі даху церкви Святої Агати в Рагузі показано, що поєднання неруйнівної звукової томографії (якісна оцінка великих ділянок) з резистографією (точкові вимірювання високої роздільності) дає найповнішу картину стану кроквяних ферм [19]. Недоліком акустичних методів є чутливість до вологості, тріщин і напряму волокон.

Хімічні індикатори. Ґрунтуються на підкисленні деревини грибами бурої гнилі [5]. Розчини кислотно-основних індикаторів змінюють колір на ураженій ділянці. Метод чутливий на ранній стадії, але потребує розкриття, спотворюється антисептиками й забрудненнями.

Відбір кернів і лабораторні випробування. Порожнистим буром відбирають керн діаметром 4–10 мм, у лабораторії визначають вологість, густину, втрату маси й видову належність гриба. Метод найточніший, проте трудомісткий і локальний.

Інфрачервона термографія. Тепловізор реєструє поле температур поверхні; ділянки з аномальною теплопровідністю (вологі, деструктовані, з порожнинами) дають локальні відхилення температури. Метод безконтактний і дає змогу швидко оглянути великі площі й виділити підозрілі зони для точкової перевірки. Його фізичне обґрунтування й межі застосування розглянуто в розділі 4.

Моніторинг. Для відповідальних споруд застосовують системи моніторингу технічного стану (SHM) з вбудованими датчиками вологості й температури деревини. Огляд [20] показує, що найпоширенішим об'єктом моніторингу дерев'яних конструкцій є саме вологість, оскільки вона визначає і деформації, і біологічний ризик. Водночас систематичний огляд [21] застерігає, що коливання температури й вологості середовища можуть маскувати ознаки пошкоджень у показах датчиків і результатах неруйнівного контролю, тому вимірювання треба виконувати за стабільних умов або вводити поправки. Порівняльну характеристику методів наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Порівняльна характеристика методів діагностики біодеструкції

Метод	**Ступінь втручання**	**Що визначає**	**Продуктивність**	**Рання стадія**
Візуальний огляд, простукування	Неруйнівний	Непрямі ознаки	Висока	Ні
Зондування, Pilodyn	Малоруйнівний	Глибину розм'якшення, густину поверхні	Середня	Частково

Метод	Ступінь втручання	Що визначає	Продуктивність	Рання стадія
Вологометрія	Неруйнівний / малоруйнівний	Вологість W	Висока	Так (ризик)
Резистографія	Малоруйнівний	Профіль густини, глибину гнилі	Середня	Так
Ультразвук, хвилі напружень	Неруйнівний	Швидкість хвиль, модуль пружності	Середня	Частково
Звукова томографія	Неруйнівний	Карту швидкостей у перерізі	Низька	Частково
Хімічні індикатори	Потребує розкриття	Підкислення деревини	Низька	Так
Керни, лабораторія	Руйнівний (локально)	W, ρ, втрату маси, вид гриба	Низька	Так
ІЧ-термографія	Неруйнівний, безконтактний	Аномалії температурного поля	Дуже висока	Частково
Моніторинг датчиками	Малоруйнівний	Зміну W і t у часі	Безперервно	Так (ризик)

З таблиці 1.3 видно, що жоден метод окремо не забезпечує одночасно високої продуктивності, кількісної оцінки й виявлення ранньої стадії. Раціональною є двоступенева схема, що відповідає настановам [2, 3]: спочатку суцільне оглядове обстеження (візуальне, тепловізійне, вологометричне) для виділення підозрілих зон, потім точкова інструментальна перевірка (резистографія, керни) лише в цих зонах. Таку схему покладено в основу програми обстеження в розділі 3.

1.5 Підходи до прогнозування динаміки біоруйнування

Прогноз розвитку біодеструкції потрібен для визначення строку наступного обстеження та моменту, коли ремонт стає невідкладним. Огляд [22] виділяє кілька груп моделей.

Лінійні та білінійні моделі виходять із того, що після інкубаційного (лагового) періоду глибина гнилі зростає зі сталою швидкістю. На такому підході побудовано австралійську інженерну методику TimberLife, у якій швидкість загнивання залежить від кліматичної зони, а для перенесення на інші регіони пропонується використовувати кліматичний індекс Шеффера [22]. Модель

проста, але не враховує сповільнення процесу в міру вичерпання здорової деревини.

Поліноміальна апроксимація результатів масових обстежень добре описує дані всередині досліджуваного інтервалу, але за його межами дає фізично неможливі результати: від'ємне пошкодження, понад 100 % або зменшення пошкодження з часом. Тому поліноми придатні лише для інтерполяції.

Ймовірнісні моделі розглядають вихід елемента з ладу як випадкову подію (розподіл Вейбулла, логнормальний розподіл). Вони добре підходять для масових об'єктів – опор, огорож, – але потребують великих вибірок.

Дозо-реакційні моделі (dose–response), розвинені в європейських дослідженнях [22, 23], пов'язують швидкість загнивання з накопиченою «дозою» сприятливих умов – добовими значеннями вологості й температури деревини. За даними 23 європейських полігонів показано, що деструкція починається після накопичення певної критичної дози, а далі пришвидшується [23]. На цій основі розробляються підходи до оцінки строку служби, що розглядаються як підґрунтя майбутніх положень Єврокоду 5 щодо довговічності.

S-подібні (логістичні) моделі описують накопичення пошкоджень диференціальним рівнянням, у якому швидкість процесу пропорційна одночасно частці вже ураженої та частці ще здорової деревини. Така крива відтворює всі три стадії процесу – інкубаційну, прискорену й згасаючу – і обмежена значеннями 0 і 1. Цей підхід застосовано в розділі 5.

1.6 Висновки до розділу 1

1) Біологічна деструкція деревини розвивається за одночасної наявності вологи ($W > 20$ %), тепла, кисню та інфекції; найнебезпечнішою для конструкцій із хвойних порід є бура гниль, яка знижує міцність на згин на 40–70 % уже при втраті маси 5–10 %.

2) У малоповерхових будівлях із мішаними конструкціями біодеструкція зосереджується в опорних вузлах балок, у підпіллях, у карнизних вузлах і під мокрими приміщеннями; значну роль відіграє порушення умов експлуатації.

3) Жоден метод діагностики окремо не є достатнім; раціональною є двоступенева схема – суцільний оглядовий контроль і точкова інструментальна перевірка підозрілих зон; резистограф забезпечує 85–100 % збігу з лабораторними даними проти 73–81 % для ручного дриля.

4) Лінійні та поліноміальні моделі не відображають стадійності біодеструкції; для прогнозування доцільно застосовувати S-подібні (логістичні, дозо-реакційні) моделі з урахуванням кліматичних умов.

5) Завдання роботи: розробити кількісні критерії біодеструкції, пов'язані з категоріями технічного стану, обґрунтувати умови тепловізійної діагностики, оцінити залишкову несучу здатність уражених балок і дослідити точність прогнозної моделі.

Розділ 2

НОРМАТИВНА БАЗА ТА КЛІМАТИЧНІ УМОВИ М. КРОПИВНИЦЬКОГО

2.1 Чинні нормативні документи у сфері обстеження й довговічності дерев'яних конструкцій

Обстеження та оцінка технічного стану дерев'яних конструкцій в Україні спираються на систему чинних ДБН і ДСТУ, значна частина яких гармонізована з європейськими стандартами. Для коректного використання результатів закордонних досліджень кожне положення треба зіставити з відповідним чинним документом. Перелік документів, на яких ґрунтується робота, і їх роль наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Чинні нормативні документи, використані в роботі

Документ	Предмет регулювання	Використання в роботі
ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 [1]	Обстеження будівель і оцінка технічного стану	Категорії технічного стану 1–4, етапи обстеження
ДБН В.3.2-2-2009 [24]	Реконструкція та капітальний ремонт житлових будинків	Склад ремонтно-відновлювальних заходів
ДБН В.2.6-161:2017 [10]; ДСТУ-Н Б EN 1995-1-1:2010 [9]	Проєктування дерев'яних конструкцій	Перевірочний розрахунок балок, kmod, γM, kdef
EN 338 [25]	Класи міцності деревини	Характеристичні значення fm,k, fv,k, E0,mean
ДБН В.1.2-2:2006 [26]	Навантаження і впливи	Змінні навантаження, аеродинамічні коефіцієнти
ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [27]	Будівельна кліматологія	Кліматичні параметри м. Кропивницького
ДБН В.2.6-31:2021 [28]	Теплова ізоляція та енергоефективність	Коефіцієнти тепловіддачі, мінімальний опір теплопередачі
ДСТУ Б EN 13187:2011 [29]	Тепловізійний контроль огороджувальних конструкцій	Умови тепловізійного обстеження
EN 335 [8], EN 350 [7]	Довговічність деревини	Класи використання 1–5, природна довговічність порід

Принципова особливість чинної системи полягає в тому, що оцінка технічного стану за ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 [1] виконується не через відсоток фізичного зносу, а через віднесення конструкції до однієї з чотирьох категорій:

– 1 – нормальний стан: дефекти й пошкодження відсутні або незначні, вимоги граничних станів виконуються, конструкція експлуатується без обмежень;

– 2 – задовільний стан: є дефекти, що не знижують несучої здатності нижче потрібної, проте можуть знижувати довговічність; потрібні заходи щодо захисту й усунення причин пошкоджень;

– 3 – непридатний до нормальної експлуатації: несуча здатність або експлуатаційна придатність знижені, але небезпеки обвалення немає; потрібні ремонт або підсилення;

– 4 – аварійний стан: є загроза обвалення; потрібні негайні заходи – обмеження доступу, тимчасові кріплення, підсилення або заміна.

Навчально-методичні посібники українських закладів вищої освіти, наприклад [30], також подають окремий розділ щодо обстеження дерев'яних конструкцій (загнивання, вологість, стан вузлів, міцність), але використовують ті самі загальні категорії для всіх видів конструкцій. Кількісних порогів для біологічної деструкції деревини ні настанова, ні методичні матеріали не містять, тому в розділі 3 запропоновано критерії, що дають змогу однозначно віднести уражений елемент до певної категорії.

Розрахунок залишкової несучої здатності, як і проєктування нових елементів, виконується за ДБН В.2.6-161:2017 [10] з урахуванням ДСТУ-Н Б EN 1995-1-1:2010 [9]. Розрахунковий опір визначають за формулою

$$f_d = k_{mod} \cdot f_k / \gamma_M , \qquad (2.1)$$

де f_k – характеристичне значення міцності для класу деревини; k_{mod} – коефіцієнт, що враховує тривалість дії навантаження й вологість (клас експлуатації); γ_M – частковий коефіцієнт для матеріалу (1,3 для масивної деревини).

Для елементів, уражених гниллю, ключовим стає визначення фактичного залишкового перерізу, що розглянуто в розділі 4.

2.2 Кліматичні умови м. Кропивницького

Місто Кропивницький розташоване в центральній частині України, на Придніпровській височині, у долинах річок Інгул і Сугоклея. Клімат помірно континентальний, з теплим, порівняно посушливим літом і помірно холодною зимою. Середньомісячні температури повітря за ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 [27] і середня кількість днів з опадами не менше 1 мм наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Середньомісячна температура повітря та кількість днів з опадами для м. Кропивницького

Показник	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
T, °C	−4,9	−3,9	0,8	9,1	15,2	18,6	20,4	19,7	14,7	8,2	2,1	−2,6
D, діб	9	8	8	7	8	8	7	5	6	6	8	9

Середньорічна температура повітря за даними таблиці 2.2 становить 8,1 °C, період із середньомісячною температурою вище +5 °C – сім місяців (квітень–жовтень). Річна кількість опадів – близько 500 мм із максимумом у червні–липні, переважно у вигляді злив. Зима нестійка, з частими відлигами. Для дерев'яних конструкцій це означає часті цикли зволоження–висихання, переходи температури через 0 °C і конденсацію вологи на холодних поверхнях кладки в осінньо-весняний період.

За ДБН В.2.6-31:2021 [28] місто належить до I температурної зони. Інженерно-геологічні умови характеризуються поширенням лесоподібних суглинків і супісків, схильних до просідання під час замочування. У долинах Інгулу і Сугоклеї та в балках ґрунтові води залягають близько до поверхні (1,5–3 м), що в поєднанні з неглибокими фундаментами старих будинків створює підвищену вологість у підпіллях. Саме ця частина забудови найбільш уразлива для біодеструкції елементів підлог першого поверху.

2.3 Кількісна оцінка кліматичної небезпеки загнивання за індексом Шеффера

Для оцінки кліматичної небезпеки біодеструкції застосовано кліматичний індекс T. C. Scheffer [31], який широко використовують у США, Канаді та країнах ЄС для районування території за потенціалом загнивання деревини поза контактом із ґрунтом (класи використання 2–3) і для перенесення інженерних моделей строку служби на інші регіони [22]. Індекс обчислюють за формулою

$$CI = \Sigma\,[(T - 2)\cdot(D - 3)] / 16{,}7\,, \qquad (2.2)$$

де T – середньомісячна температура повітря, °C; D – кількість днів у місяці з опадами (в оригінальній методиці – не менше 0,25 мм; у роботі прийнято кількість днів з опадами не менше 1 мм, що дає нижню оцінку індексу); підсумовування виконують за 12 місяців, причому від'ємні множники ($T < 2$ °C або $D < 3$) приймають рівними нулю.

Шкала Шеффера: $CI < 35$ – низький потенціал загнивання, 35–65 – помірний, $CI > 65$ – високий. Результати розрахунку подано в таблиці 2.3 і на рисунку 2.1.

Таблиця 2.3 Розрахунок кліматичного індексу Шеффера для м. Кропивницького (розрахунок автора)

Місяць	T, °C	D, діб	(T − 2)·(D − 3)	Внесок у CI
I	−4,9	9	0	0,00
II	−3,9	8	0	0,00
III	0,8	8	0	0,00
IV	9,1	7	28,4	1,70
V	15,2	8	66,0	3,95
VI	18,6	8	83,0	4,97
VII	20,4	7	73,6	4,41
VIII	19,7	5	35,4	2,12
IX	14,7	6	38,1	2,28
X	8,2	6	18,6	1,11
XI	2,1	8	0,5	0,03
XII	−2,6	9	0	0,00
Разом	–	–	**343,6**	**20,6**

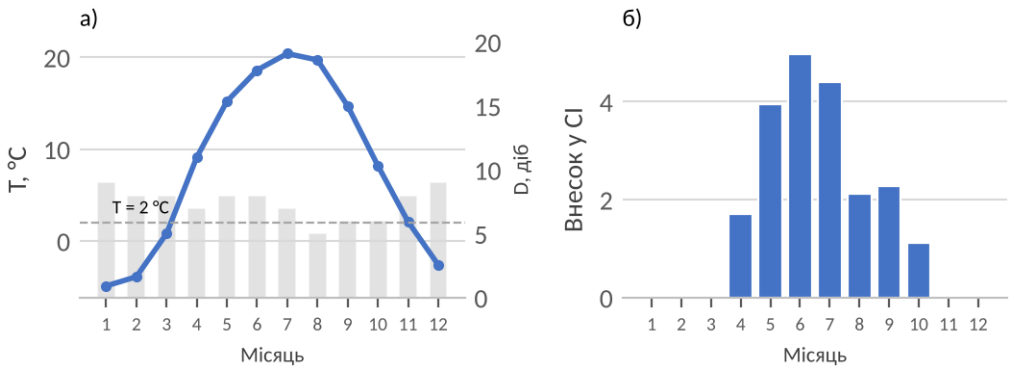

Рис. 2.1 Кліматичні умови м. Кропивницького: а) середньомісячна температура й кількість днів з опадами; б) місячні внески в індекс Шеффера (розрахунок автора)

Індекс для м. Кропивницького становить CI = 20,6, тобто місто належить до зони низького потенціалу загнивання. Причина – у розподілі опадів: найтепліші місяці (липень–серпень) водночас є найпосушливішими. З рисунка 2.1, б видно, що основний внесок у індекс дають травень–липень, а серпень і вересень через малу кількість днів з опадами «додають» небагато.

Оскільки клімат змінюється, а кількість днів з опадами істотно коливається від року до року, виконано аналіз чутливості індексу до підвищення температури ΔT і зміни кількості днів з опадами ΔD у кожному теплому місяці (рисунок 2.2, таблиця 2.4).

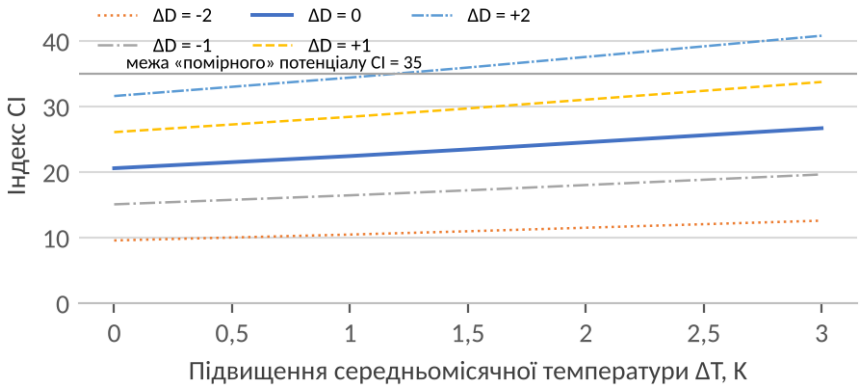

Рис. 2.2 Чутливість індексу Шеффера до потепління та зміни кількості днів з опадами (розрахунок автора)

Таблиця 2.4

Значення індексу CI за різних сценаріїв (розрахунок автора)

ΔD, діб/міс.	**ΔT = 0**	**ΔT = +1 K**	**ΔT = +2 K**	**ΔT = +3 K**
−2	9,6	10,5	11,5	12,6
−1	15,1	16,4	18,0	19,6
0	20,6	22,4	24,5	26,7
+1	26,1	28,4	31,0	33,7
+2	31,6	34,4	37,6	40,8

Аналіз показує, що індекс значно чутливіший до кількості днів з опадами, ніж до температури: один додатковий дощовий день на місяць підвищує CI на 27 %, тоді як потепління на 1 K – лише на 9 %. Перехід до зони помірного потенціалу (CI ≥ 35) можливий лише за одночасного збільшення кількості днів з опадами на два на місяць і потепління щонайменше на 1,5 K. Отже, міжрічні коливання кількості днів з опадами впливають на результат сильніше, ніж реалістичні кліматичні зміни температури.

Практичний висновок важливий для подальших розділів: для елементів, що зволожуються атмосферною вологою (карнизи, обшивки, ґанки, вікна), кліматична небезпека в регіоні невисока, і визначальним є стан водовідведення. Для елементів, що зволожуються з ґрунту чи через протікання (підлоги в підпіллі, опори балок), визначальними є не опади, а температура й тривалість теплого періоду, і тут умови Кропивницького з довгим теплим сезоном є несприятливими. Слід підкреслити обмеження індексу: він характеризує макроклімат і не враховує мікроклімат конкретної конструкції – орієнтацію фасаду, затінення, вологість підпілля. Тому стан конкретного елемента оцінюється лише за результатами обстеження.

2.4 Висновки до розділу 2

1) Систематизовано чинні нормативні документи у сфері обстеження й довговічності дерев'яних конструкцій; основою оцінки є категорії технічного стану за ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016, для яких відсутні кількісні критерії біодеструкції деревини.

2) Кліматичний індекс Шеффера для м. Кропивницького становить 20,6 (низький потенціал загнивання) завдяки посушливості найтепліших місяців.

3) Індекс у 3 рази чутливіший до кількості днів з опадами, ніж до потепління: +1 день/міс. дає +27 %, +1 K – +9 %; перехід до помірного потенціалу можливий лише за поєднання обох змін.

4) Найуразливішою частиною міської забудови є будинки в долинах річок і балках з близьким рівнем ґрунтових вод, де підпілля й підлоги першого поверху фактично працюють в умовах класу використання 3–4.

Розділ 3

ОБ'ЄКТ ОБСТЕЖЕННЯ, МЕТОДИКА ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ БІОЛОГІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ

3.1 Характеристика об'єкта обстеження

Об'єктом дослідження прийнято двоповерховий двосекційний восьмиквартирний житловий будинок 1958 року побудови в м. Кропивницькому. Будинки такого типу масово зводилися в місті в 1950-х роках і досі становлять помітну частку житлового фонду. Об'єкт розташований на пониженій ділянці поблизу заплави, рівень ґрунтових вод – 2,2 м від поверхні. Конкретна адреса в роботі не наводиться. Основні конструктивні рішення будинку наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Конструктивна характеристика об'єкта обстеження

Елемент	Конструктивне рішення
Габарити	26,4 × 11,6 м; висота поверху 3,0 м; два поверхи, технічне підпілля висотою 0,6 м
Фундаменти	Стрічкові бутобетонні, глибина закладання 1,2 м; горизонтальна гідроізоляція з двох шарів толю (частково зруйнована)
Стіни	Зовнішні – цегляні товщиною 510 мм, внутрішня поздовжня – 380 мм; цементно-вапняна штукатурка
Міжповерхове перекриття	Балки з сосни 180×260 мм з кроком 0,9 м, проліт 5,4 м; накат із дошок, глиняна змазка, шлакова засипка, дощата підлога по лагах, стеля – штукатурка по драні
Горищне перекриття	Аналогічне міжповерховому, утеплювач – шлак 150 мм
Підлога 1-го поверху	Дощата по лагах 80×100 мм на цегляних стовпчиках у підпіллі; продухи в цоколі 150×150 мм (12 шт.)
Дах	Двосхилий, кроквяна система з сосни: крокви 80×180 мм з кроком 1,0 м, мауерлат 160×160 мм
Покрівля	Хвилясті азбестоцементні листи, над однією секцією замінені на металочерепицю (2012 р.)
Сходи	Дерев'яні на косоурах, по два марші в кожній секції
Інженерні мережі	Водопровід, каналізація, газопостачання; опалення – індивідуальні газові котли (раніше – печі)

Капітальний ремонт будинку не виконувався, поточні ремонти здійснювалися епізодично силами мешканців. За опитуванням мешканців,

протягом останніх 15 років у двох квартирах першого поверху ремонтувалася підлога через прогини, а у квартирі другого поверху під санвузлом спостерігалися протікання на стелю нижньої квартири.

3.2 Програма обстеження

Програму обстеження складено відповідно до ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 [1] з урахуванням двофазної процедури європейських настанов [2, 3] і двоступеневої схеми, обґрунтованої в розділі 1. Обстеження виконують у три етапи.

Етап 1. Підготовчий. Збір і аналіз технічної документації (технічний паспорт, акти попередніх обстежень, відомості про ремонти), опитування мешканців і керуючої організації щодо протікань, прогинів, запахів, місць появи плісняви. Складання схем поверхів із розташуванням мокрих приміщень, трубопроводів і вентиляційних отворів. Вибір періоду для тепловізійного обстеження (за розрахунком розділу 4 – грудень–лютий за температури зовнішнього повітря не вище −5 °C).

Етап 2. Суцільне оглядове обстеження. Огляд фасадів, цоколя, відмостки, водостоків, покрівлі, горища й підпілля; простукування доступних дерев'яних елементів; вимірювання вологості деревини вологоміром у характерних точках (не менше трьох точок на елемент у зонах ризику за таблицею 1.2); тепловізійна зйомка стель і підлог зсередини приміщень і фасадів ззовні; фіксація зон аномалій. Результатом етапу є карта підозрілих зон.

Етап 3. Детальне інструментальне обстеження. Для кожної підозрілої зони: розкриття (зняття плінтуса, дошки підлоги, частини штукатурки біля опори балки), зондування, резистографія або відбір кернів, визначення вологості й густини, відбір зразків для мікологічного аналізу, обмір залишкового перерізу. Свердління резистографом виконують з обох боків перерізу, не ближче 20 мм від тріщин, з подальшим закриттям отворів антисептованими пробками [17]. За результатами для кожного елемента обчислюють інтегральний показник біодеструкції (підрозділ 3.3) і визначають категорію технічного стану; для

несучих елементів виконують перевірочний розрахунок (підрозділ 4.4). Послідовність етапів показано на рисунку 3.1.

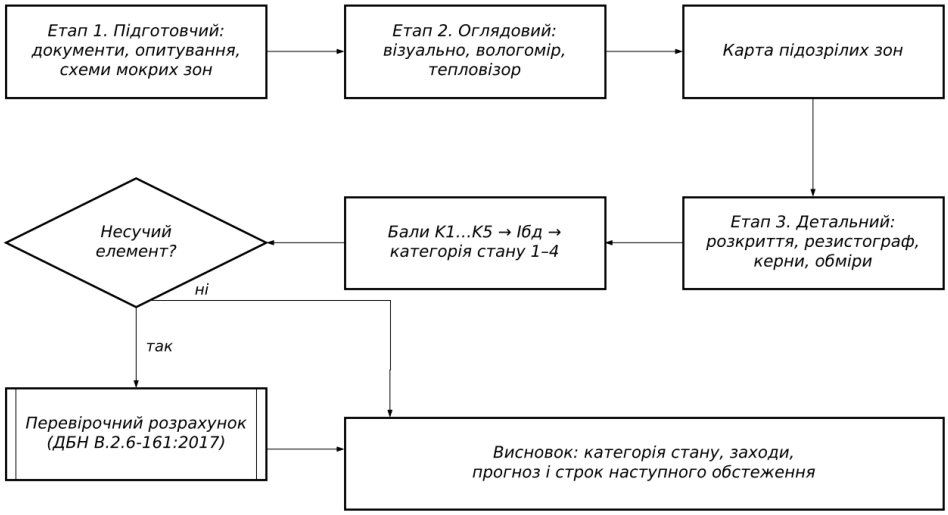

Рис. 3.1 Схема обстеження будинку за критеріями біодеструкції (розроблено автором)

Мінімальний обсяг детального обстеження для будинків цього типу пропонується прийняти таким: усі опорні вузли балок на зовнішніх стінах під мокрими приміщеннями й у кутах будинку; не менше 20 % інших опорних вузлів; усі зони тепловізійних аномалій; не менше двох розкриттів підлоги першого поверху в кожній квартирі; карнизний вузол на кожному фасаді в трьох точках.

Перелік приладів і обладнання: тепловізор із температурною чутливістю (NETD) не гірше 0,05–0,08 K і матрицею не менше 320×240 пікселів; кондуктометричний вологомір деревини з поправками на породу й температуру; ІЧ-пірометр для точкових контрольних вимірів; резистограф або пробовідбірник для кернів діаметром 5 мм; щуп-шило, молоток, рулетка, штангенциркуль, лазерний далекомір; ліхтар, фотокамера; переносна драбина й засоби індивідуального захисту (розділ 6).

3.3 Система критеріїв і інтегральний показник біологічної деструкції

Для переходу від окремих ознак до однозначної категорії технічного стану запропоновано п'ять критеріїв біологічної деструкції, кожен з яких оцінюється за

шкалою від 0 до 4 балів (таблиця 3.2). Пороги критеріїв встановлено на підставі відомостей про умови розвитку грибів [4, 5, 11], класифікації вологості [14] і залежності міцності від втрати маси [6].

Таблиця 3.2

Шкала оцінки критеріїв біологічної деструкції

Критерій (вага w)	**0 балів**	**1 бал**	**2 бали**	**3 бали**	**4 бали**
K1. Вологість W, % (0,25)	< 18	18–20	20–25	25–30	> 30
K2. Відносна глибина ураження a / bmin (0,30)	0	до 0,05	0,05–0,10	0,10–0,20	> 0,20
K3. Втрата густини Δρ, % (0,20)	< 3	3–10	10–20	20–35	> 35
K4. Площа ураження, % поверхні (0,15)	0	до 10	10–25	25–50	> 50
K5. Біологічні ознаки (0,10)	Відсутні	Цвіль, пліснява	Поодинокі льотні отвори, плівки міцелію	Тяжі міцелію, бура гниль, буровий пил	Плодові тіла, масове ураження

Межі критерію K1 узгоджено з класифікацією [14]: діапазон 20–25 % відповідає класу «поганий», понад 25 % – «критичний»; додатково виділено межу 30 % (точка насичення волокон), вище якої деструкція протікає найінтенсивніше. Інтегральний показник біологічної деструкції елемента визначається як зважена сума балів:

$$I_{бд} = \Sigma\, w_j \cdot s_j\,, \quad j = 1\ldots5\,, \tag{3.1}$$

де w_j – вага j-го критерію ($\Sigma\, w_j = 1$); s_j – бал за j-м критерієм.

Найбільшу вагу (0,30) надано глибині ураження, оскільки саме вона безпосередньо визначає залишковий переріз і несучу здатність. Вологість (0,25) характеризує активність процесу та швидкість його подальшого розвитку. Втрата густини (0,20) опосередковано відображає втрату міцності: за даними [6] вона близька до втрати маси, а остання вже на рівні 10 % може означати втрату половини міцності на згин. Площа ураження (0,15) і біологічні ознаки (0,10)

мають допоміжне значення. Зв'язок значень Ібд з категоріями технічного стану прийнято таким:

– Ібд < 0,8 – категорія 1 (нормальний стан);

– 0,8 ≤ Ібд < 1,8 – категорія 2 (задовільний стан, потрібні профілактичні заходи й усунення причин зволоження);

– 1,8 ≤ Ібд < 2,8 – категорія 3 (непридатний до нормальної експлуатації, потрібні перевірочний розрахунок і ремонт);

– Ібд ≥ 2,8 – категорія 4 (аварійний стан, невідкладні заходи).

Додатково введено обов'язкове правило: якщо перевірочний розрахунок (підрозділ 4.4) показує невиконання умови міцності, елемент відносять до категорії 4 незалежно від значення Ібд; якщо не виконується лише умова прогину – щонайменше до категорії 3. Тим самим бальна оцінка доповнює, а не підміняє розрахунок несучої здатності. Апробацію шкали виконано для п'яти характерних зон об'єкта (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3

Оцінка біологічної деструкції характерних зон об'єкта (розрахунок автора)

Зона	**K1**	**K2**	**K3**	**K4**	**K5**	**Ібд**	**Категорія**
Кінці балок міжповерхового перекриття (зовнішня стіна, вісь А)	3	2	2	2	2	2,25	3
Лаги й підлога 1-го поверху над підпіллям (під санвузлами)	4	3	3	3	4	3,35	4
Мауерлат і кінці крокв по осі 1	2	2	1	1	2	1,65	2
Горищне перекриття в середині прольоту	1	0	0	1	0	0,40	1
Сходовий марш, нижня тятива	2	1	1	1	1	1,25	2

Найгірший стан мають лаги й підлога першого поверху над підпіллям під санвузлами (Ібд = 3,35, категорія 4 – аварійний): вологість деревини перевищує 30 %, виявлено плодові тіла домового гриба, втрата перерізу перевищує 20 %. Опорні кінці балок міжповерхового перекриття на зовнішній стіні по осі А мають Ібд = 2,25 (категорія 3), що вимагає перевірочного розрахунку (розділ 4). Мауерлат і кінці крокв, а також нижня тятива сходів перебувають у задовільному

стані (категорія 2), горищне перекриття в прольоті – у нормальному. Наочно результати оцінки подано на рисунку 3.2; відтінок стовпчика відповідає категорії стану.

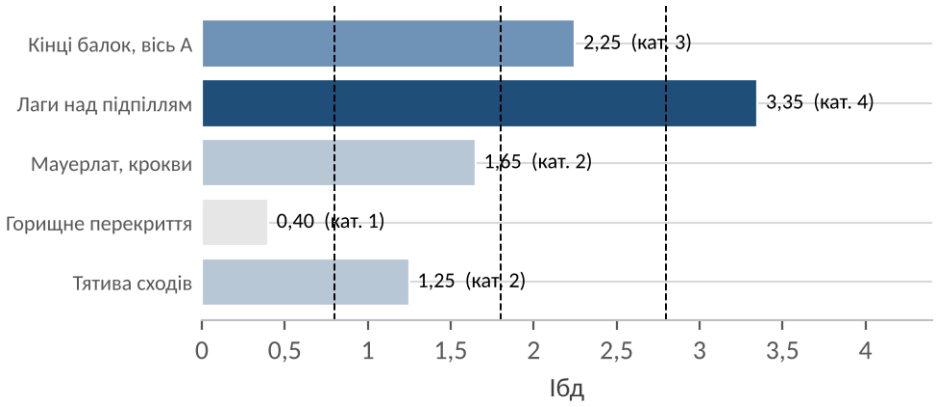

Рис. 3.2 Інтегральний показник біодеструкції характерних зон об'єкта (розрахунок автора)

Для перевірки стійкості оцінки до вибору ваг виконано простий аналіз чутливості: при зміні ваги будь-якого критерію на ±0,05 (з пропорційним перерозподілом решти) значення Ібд для зон таблиці 3.3 змінюються не більше ніж на 0,05, і жодна зона не переходить в іншу категорію. Отже, результат визначається насамперед виміряними показниками, а не суб'єктивним вибором ваг.

3.4 Оцінка фізичного зносу будинку

Хоча чинна методика оцінки технічного стану не спирається на відсоток фізичного зносу, цей показник залишається потрібним для техніко-економічних розрахунків, обґрунтування доцільності капітального ремонту за ДБН В.3.2-2-2009 [24] та інвентаризації. Фізичний знос конструкції з ділянками різного ступеня пошкодження визначають як середньозважене значення:

$$Ф_к = \Sigma\, Ф_i \cdot P_i \,/\, P_к\,, \qquad (3.2)$$

де $Ф_i$ – знос і-ї ділянки, %; P_i – площа (довжина) ділянки, м² (м); $P_к$ – площа (довжина) конструкції в цілому.

Для горищного перекриття площею 170 м² виділено три ділянки: 120 м² зі зносом 10 %, 38 м² зі зносом 40 % (зона протікань біля карниза) і 12 м² зі зносом 70 % (над санвузлами, де виявлено гниль накату). Тоді

$$\Phi_к = (10\cdot120 + 40\cdot38 + 70\cdot12) / 170 = 20{,}9\ \% \approx 20\ \% . \qquad (3.3)$$

Загальний фізичний знос будинку визначають з урахуванням питомої ваги кожного елемента у відновній вартості:

$$\Phi_з = \Sigma\ \Phi_{кі}\cdot l_і , \qquad (3.4)$$

де $\Phi_{кі}$ – знос і-го конструктивного елемента, %; $l_і$ – частка елемента у відновній вартості будинку.

Таблиця 3.4

Розрахунок фізичного зносу будинку (розрахунок автора)

Конструктивний елемент	**Частка li**	**Знос Фкі, %**	**Фкі·li, %**
Фундаменти й цоколь	0,08	25	2,00
Стіни цегляні	0,30	30	9,00
Перекриття міжповерхове дерев'яне	0,10	45	4,50
Перекриття горищне дерев'яне	0,06	20	1,20
Кроквяна система й мауерлат	0,07	40	2,80
Покрівля	0,05	50	2,50
Підлоги дерев'яні 1-го поверху	0,07	55	3,85
Вікна й двері	0,09	40	3,60
Сходи дерев'яні	0,03	35	1,05
Оздоблення	0,05	45	2,25
Інженерні мережі	0,10	50	5,00
Разом	**1,00**	**–**	**37,75**

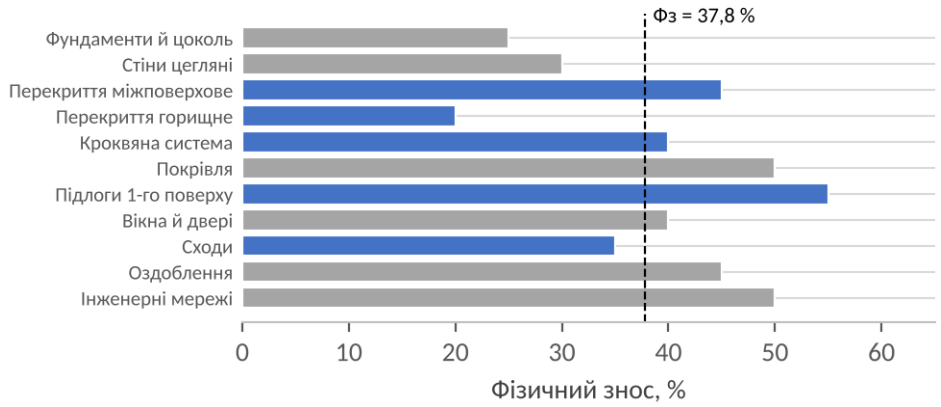

Рис. 3.3 Фізичний знос конструктивних елементів будинку; синім виділено дерев'яні елементи (розрахунок автора)

Загальний фізичний знос будинку становить Фз = 37,75 % ≈ 38 %. Середньозважений знос лише дерев'яних елементів – 40,6 %, тобто вищий за загальний; це підтверджує, що саме дерев'яні конструкції, уражені біодеструкцією, визначають потребу в капітальному ремонті. Водночас загальний відсоток зносу «розмиває» локальну аварійну ситуацію: при Фз = 38 % будинок формально потребує лише капітального ремонту, тоді як підлога над підпіллям уже перебуває в аварійному стані. Цей приклад наочно показує, чому оцінку за критеріями біодеструкції слід виконувати поелементно, а не обмежуватися інтегральним зносом.

3.5 Висновки до розділу 3

1) Розроблено триетапну програму обстеження малоповерхових будинків із дерев'яними конструкціями, що поєднує суцільний оглядовий контроль із точковою інструментальною перевіркою зон ризику та визначає мінімальні обсяги розкриттів.

2) Запропоновано п'ять критеріїв біологічної деструкції (вологість, відносна глибина ураження, втрата густини, площа ураження, біологічні ознаки) з бальною шкалою й інтегральний показник Ібд, пов'язаний з категоріями технічного стану за ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016; межі за вологістю узгоджено із сучасною класифікацією.

3) Апробація на об'єкті виявила аварійний стан підлоги над підпіллям (Ібд = 3,35) і непридатний до нормальної експлуатації стан опорних ділянок балок (Ібд = 2,25), тоді як загальний фізичний знос будинку становить лише 38 %.

Розділ 4
ІНСТРУМЕНТАЛЬНА ДІАГНОСТИКА ТА ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОЇ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ

4.1 Фізичні основи інфрачервоної діагностики біодеструкції

Біохімічне руйнування деревини грибами бурої гнилі починається з ферментативного гідролізу целюлози до глюкози, яка далі окиснюється з утворенням вуглекислого газу й води [5]:

$$(C_6H_{10}O_5)_n + n\cdot H_2O \rightarrow n\cdot C_6H_{12}O_6\ ;\quad C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + Q\ . \quad (4.1)$$

Отже, гниття супроводжується виділенням так званої метаболічної води, а гриби з розвиненою системою міцеліальних тяжів (насамперед Serpula lacrymans) здатні ще й переносити воду з вологих зон у сухі. Тому деструктована деревина в будівлях здебільшого має вищу вологість, ніж навколишня здорова. Одночасно знижується густина: на розвинених стадіях бурої гнилі втрата маси деревини сягає десятків відсотків [5].

Ці два процеси впливають на теплопровідність у протилежних напрямках. Зростання вологості підвищує теплопровідність, оскільки вода проводить тепло приблизно в 23 рази краще за повітря в порожнинах клітин. Зниження густини, навпаки, зменшує теплопровідність, бо частка твердої клітинної стінки в об'ємі зменшується. Для кількісної оцінки використано емпіричну залежність теплопровідності деревини поперек волокон від відносної густини G і вологості W, наведену в довіднику Лабораторії лісових продуктів США [4]:

$$\lambda = 0{,}1442\cdot[G\cdot(1{,}39 + c\cdot W) + 0{,}165]\ , \quad (4.2)$$

де λ – теплопровідність, Вт/(м·К); 0,1442 – коефіцієнт переведення з британських одиниць; c – коефіцієнт впливу вологості.

У вихідному вигляді залежність має два значення c (0,028 при $W \le 40$ % і 0,038 при $W > 40$ %), через що функція має розрив, який при аналізі контрасту температур дає штучний «стрибок». Тому в роботі прийнято неперервну апроксимацію з переломом у точці насичення волокон: $c = 0{,}028$ при $W \le 30$ %,

а вище 30 % приріст обчислюється з коефіцієнтом 0,038 від значення при W = 30 %. Фізично це відповідає переходу від зв'язаної води в клітинних стінках до вільної води в порожнинах.

Для здорової сосни (G = 0,45, W = 12 %) формула (4.2) дає λ = 0,136 Вт/(м·К), що узгоджується з довідковими значеннями для повітряно-сухої деревини поперек волокон [4]. Значення для деструктованої деревини при втраті густини Δρ = 20, 35 і 50 % наведено в таблиці 4.1 і на рисунку 4.1.

Таблиця 4.1

Теплопровідність здорової та деструктованої деревини сосни, Вт/(м·К) (розрахунок автора)

W, %	Здорова деревина	Δρ = 20 %	Δρ = 35 %	Δρ = 50 %
12	0,136	0,113	0,097	0,080
20	0,150	0,125	0,106	0,087
25	0,159	0,132	0,112	0,092
30	0,168	0,140	0,118	0,096
40	0,193	0,159	0,134	0,108
50	0,218	0,179	0,150	0,121
60	0,242	0,199	0,166	0,133

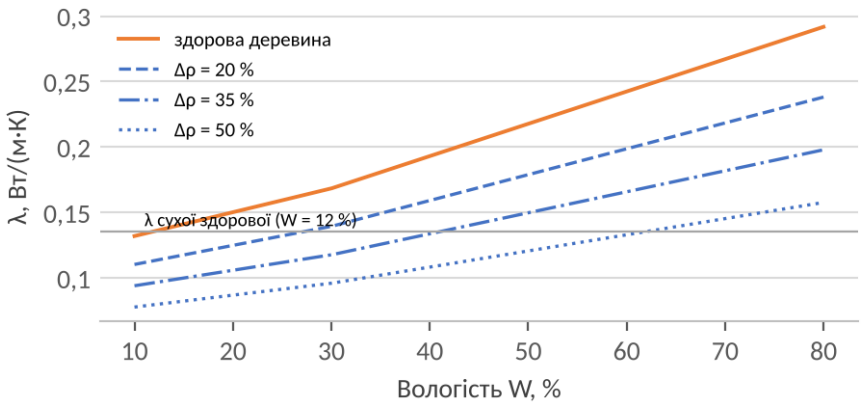

Рис. 4.1 Теплопровідність здорової та ураженої гниллю деревини залежно від вологості (розрахунок автора за залежністю [4])

З таблиці 4.1 випливає важливий результат: за однакової вологості деструктована деревина завжди проводить тепло гірше за здорову, оскільки вона легша. Вищу теплопровідність, ніж у сухої здорової деревини (λ = 0,136

Вт/(м·К)), ділянка з гниллю набуває лише після певної вологості Wінв. Отже, суха гниль (давнє ураження, що висохло, або ділянка, зруйнована комахами) на термограмі з внутрішнього боку стіни проявляється як «тепла» пляма, а активне вологе вогнище гниття – як «холодна». Обидва типи аномалій є підставою для перевірки.

Вологість інверсії знаку аномалії Wінв визначено з умови $\lambda(G\cdot(1-\Delta\rho), W_{інв}) = \lambda(G, 12\,\%)$. Результати розрахунку показано на рисунку 4.2: Wінв зростає з глибиною деструкції від 15 % при $\Delta\rho = 5$ % до 27 % при 20 %, 41 % при 35 % і 62 % при 50 %. Таким чином, для ранньої стадії ураження інверсія відбувається ще до точки насичення волокон, а для глибокої деструкції – лише в майже водонасиченій деревині.

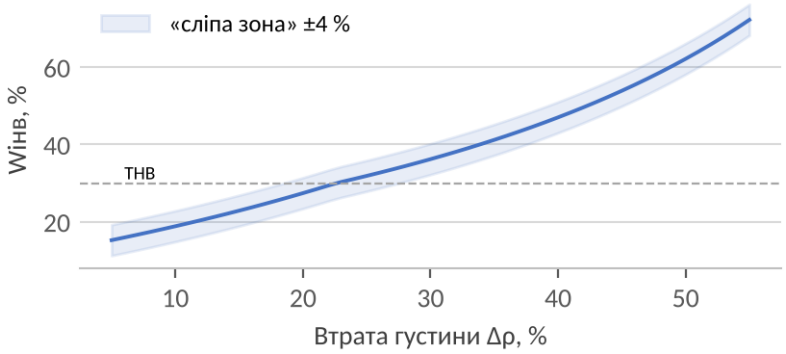

Рис. 4.2 Вологість інверсії знаку температурної аномалії залежно від втрати густини деревини (розрахунок автора)

4.2 Теплотехнічне обґрунтування умов тепловізійного обстеження

Щоб оцінити, чи буде аномалія помітна на термограмі в кліматичних умовах м. Кропивницького, виконано розрахунок температури внутрішньої поверхні дерев'яної стіни з брусу товщиною 150 мм (характерне рішення для дерев'яних будинків і прибудов приватного сектора) над здоровою та над ураженою ділянкою. Приймалося одновимірне стаціонарне теплопередавання:

$$R = 1/\alpha_в + \delta/\lambda + 1/\alpha_з\,; \quad \tau_в = t_в - (t_в - t_з)\,/\,(R\cdot\alpha_в)\,, \tag{4.3}$$

де $\alpha_в = 8{,}7$ Вт/(м²·К), $\alpha_з = 23$ Вт/(м²·К) – коефіцієнти тепловіддачі [28]; $t_в = 20$ °С; $t_з$ – температура зовнішнього повітря; $\delta = 0{,}15$ м.

Опір теплопередачі стіни із сухого здорового брусу становить R = 1,26 м²·К/Вт. Це більш ніж утричі менше мінімально допустимого значення для зовнішніх стін I температурної зони (4,0 м²·К/Вт за ДБН В.2.6-31:2021 [28]), тобто такі стіни потребують утеплення – і це додатковий аргумент на користь обстеження перед утепленням, щоб не «закрити» вогнища гниття під новим оздобленням. Різницю температур внутрішньої поверхні над здоровою й ураженою деревиною (Δρ = 35 %) наведено в таблиці 4.2 і на рисунку 4.3.

Таблиця 4.2

Різниця температур внутрішньої поверхні Δτ = τздор − τураж, К, при Δρ = 35 % (розрахунок автора)

W, %	λ, Вт/(м·К)	tз = 0 °C	tз = −5 °C	tз = −10 °C	tз = −22 °C
20	0,106	−0,36	−0,45	−0,54	−0,75
30	0,118	−0,21	−0,27	−0,32	−0,45
45	0,142	0,07	0,09	0,11	0,15
60	0,166	0,34	0,43	0,52	0,72

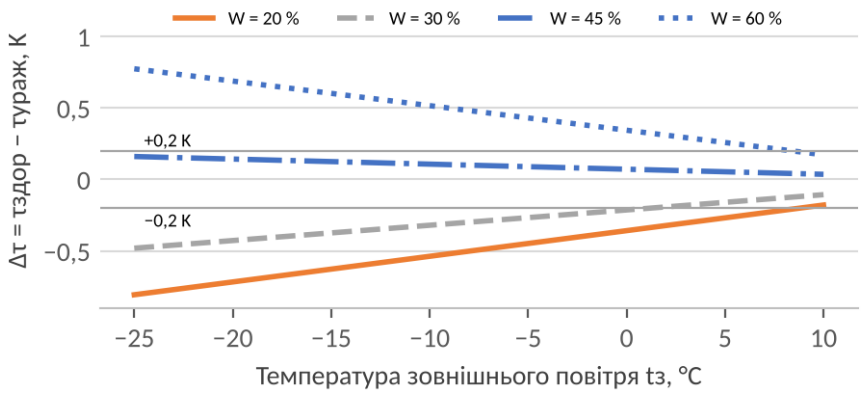

Рис. 4.3 Залежність контрасту температур на внутрішній поверхні стіни від температури зовнішнього повітря (розрахунок автора)

Сучасні неохолоджувані тепловізори мають температурну чутливість 0,04–0,08 К, проте на реальному об'єкті через нерівномірність випромінювальної здатності, відбиття й конвекційні потоки надійно інтерпретувати можна аномалії не менше ±0,2 К. Розрахунок показує, що цей поріг досягається: для ділянки з W = 20 % – уже при tз ≤ 8,8 °C; для W = 30 % – при tз ≤ 1,3 °C; для W = 50 % – при tз ≤ −4,5 °C. Для W = 45 %, близької до точки інверсії (41 %), потрібна

температура −36 °C, тобто така ділянка практично не виявляється. «Сліпа зона» методу при tз = −10 °C охоплює вологість 34–48 %, при −22 °C – 36–46 %. Систематичний огляд [21] також наголошує, що зміна температурно-вологісних умов середовища під час вимірювань здатна маскувати сигнал пошкодження, тому стабільність режиму є обов'язковою умовою.

Звідси випливають практичні вимоги до тепловізійного обстеження в умовах м. Кропивницького, узгоджені з ДСТУ Б EN 13187:2011 [29]:

– обстеження виконувати в опалювальний період при температурі зовнішнього повітря не вище −5 °C (перепад не менше 25 K), переважно в грудні–лютому;

– протягом 12 год до зйомки та під час неї не повинно бути прямого сонячного опромінення, опадів і сильного вітру; приміщення мають опалюватися в стабільному режимі не менше доби;

– для дерев'яних стін і перекриттів зйомку виконувати зсередини приміщень, оскільки обшивка фасадів із повітряним прошарком маскує стан деревини;

– для перекриттів над неопалюваним підпіллям найбільш інформативною є зйомка підлоги першого поверху після зняття килимових покриттів; для горищних перекриттів – зйомка стелі верхнього поверху;

– розшифровувати як підозрілі і «холодні», і «теплі» аномалії; кожну аномалію перевіряти вологоміром, а при W > 20 % – інструментально;

– з огляду на «сліпу зону» відсутність аномалії не є доказом відсутності гнилі в зонах ризику; там обов'язкова точкова перевірка.

4.3 Точкова інструментальна перевірка

Для перевірки виявлених аномалій і зон ризику застосовують:

– вологометрію у трьох точках по довжині підозрілої ділянки й у контрольній точці на здоровій ділянці того ж елемента на відстані 0,4–0,5 м; різниця понад 5 % вологості є значущою;

– ІЧ-пірометр із лазерним наведенням для вибіркового контролю температури поверхні під вікнами, біля опор балок і в санвузлах;

– резистографію: свердління перпендикулярно до бічної грані балки на відстані 50, 150 і 300 мм від грані стіни, з обох боків перерізу [17]; за профілем опору визначають глибину гнилі a з кожного боку перерізу;

– відбір кернів діаметром 4,5–5 мм на глибину до 65 мм із визначенням вологості й густини гравіметричним методом і видової належності гриба; отвори після відбору заповнюють антисептованими дерев'яними пробками на клеї.

Принцип визначення глибини ураження за резистограмою показано на рисунку 4.4. Деревину з опором менше 50 % від опору здорової деревини того ж елемента пропонується вважати повністю втраченою для несучої здатності; глибини a_1 і a_2 відраховуються від граней до точок перетину профілю з цим рівнем. Як зазначено в [16], для надійної інтерпретації потрібен еталонний профіль здорової деревини тієї самої породи, тому в кожному елементі виконують контрольне свердління на здоровій ділянці.

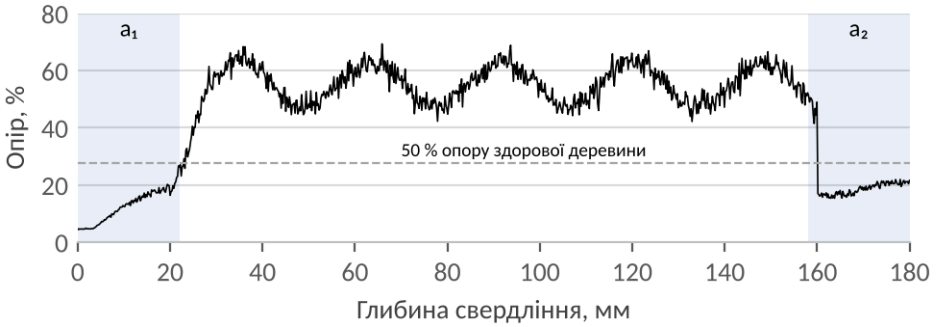

Рис. 4.4 Схематична резистограма балки з ураженням з обох боків перерізу (схема автора)

4.4 Залишкова несуча здатність балки перекриття, ураженої гниллю

Перевірочний розрахунок виконано для балки міжповерхового перекриття об'єкта: переріз b×h = 180×260 мм, розрахунковий проліт l = 5,4 м, крок 0,9 м, деревина сосни. Клас міцності старої деревини без сортування прийнято C24 за EN 338 [25] ($f_{m,k}$ = 24 МПа, $f_{v,k}$ = 4,0 МПа, $E_{0,mean}$ = 11 000 МПа); на реальному об'єкті клас слід підтвердити візуальним сортуванням на місці, як рекомендують

настанови [2], або випробуванням зразків. Клас експлуатації – 1, kmod = 0,8 (середньотривале навантаження), γM = 1,3 [9, 10]. Збір навантажень наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Навантаження на 1 м² міжповерхового перекриття

Вид навантаження	**Характеристичне, кПа**	**γf**	**Розрахункове, кПа**
Дощата підлога 37 мм по лагах	0,25	1,1	0,28
Накат із дошок 40 мм	0,22	1,1	0,24
Змазка глиняна 20 мм	0,36	1,1	0,40
Засипка шлакова 120 мм	0,96	1,1	1,06
Штукатурка по драні 25 мм	0,45	1,1	0,50
Власна вага балки	0,26	1,1	0,29
Разом постійне	2,50	–	2,75
Змінне (житлові приміщення) [26]	1,50	1,3	1,95

Розрахункове погонне навантаження на балку q = (2,75 + 1,95)·0,9 = 4,23 кН/м. Розрахункові зусилля:

$$M_{Ed} = q \cdot l^2/8 = 4{,}23 \cdot 5{,}4^2/8 = 15{,}42 \text{ кН·м} ; \quad V_{Ed} = q \cdot l/2 = 11{,}42 \text{ кН} . \qquad (4.4)$$

Розрахункові опори за (2.1): fm,d = 0,8·24/1,3 = 14,77 МПа; fv,d = 0,8·4,0/1,3 = 2,46 МПа. Гниль у балках, закладених у стіни, розвивається переважно з нижньої та бічних граней (з боку кладки й накату). Тому залишковий переріз при глибині ураження a моделюється як bеф = b − 2a, hеф = h − a (рисунок 4.5). Перевірки:

$$\sigma_{m,d} = M_{Ed} / W_{еф} \le f_{m,d} , \quad W_{еф} = b_{еф} \cdot h_{еф}^2/6 ; \qquad (4.5)$$

$$\tau_d = 1{,}5 \cdot V_{Ed} / (k_{cr} \cdot b_{еф} \cdot h_{еф}) \le f_{v,d} , \quad k_{cr} = 0{,}67 ; \qquad (4.6)$$

$$w_{fin} = 5 \cdot [g_k(1 + k_{def}) + q_k(1 + \psi_2 \cdot k_{def})] \cdot s \cdot l^4 / (384 \cdot E_{0,mean} \cdot I_{еф}) \le l/200 , \qquad (4.7)$$

де k_{def} = 0,6 (клас експлуатації 1); ψ_2 = 0,3 – коефіцієнт квазіпостійного значення змінного навантаження; s = 0,9 м – крок балок; $I_{еф} = b_{еф} \cdot h_{еф}^3/12$.

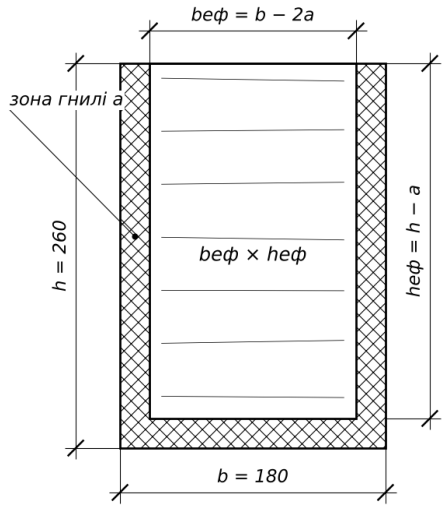

Рис. 4.5 Розрахункова схема перерізу балки, ураженої гниллю з трьох боків (схема автора)

Перевірку за зрізом виконано з послабленим перерізом, хоча в реальності ураження опорної ділянки впливає насамперед на зріз і зминання, а в прольоті – на згин і прогин. Такий підхід дає консервативну оцінку для випадку, коли гниль поширилася по всій довжині балки (типово для балок над мокрими приміщеннями). Результати для глибини ураження від 0 до 40 мм наведено в таблиці 4.4 і на рисунку 4.6.

Таблиця 4.4

Залишкова несуча здатність і жорсткість балки перекриття залежно від глибини гнилі (розрахунок автора)

a, мм	bеф×hеф, мм	σm,d, МПа	σ/fm,d	τd, МПа	τ/fv,d	wfin, мм	w/wlim
0	180×260	7,60	0,51	0,55	0,22	19,8	0,73
5	170×255	8,37	0,57	0,59	0,24	22,3	0,82
10	160×250	9,25	0,63	0,64	0,26	25,1	0,93
15	150×245	10,27	0,70	0,70	0,28	28,4	1,05
20	140×240	11,47	0,78	0,76	0,31	32,4	1,20
25	130×235	12,89	0,87	0,84	0,34	37,2	1,38
30	120×230	14,57	0,99	0,93	0,38	43,0	1,59
35	110×225	16,61	1,12	1,03	0,42	50,1	1,85
40	100×220	19,11	1,29	1,16	0,47	58,9	2,18

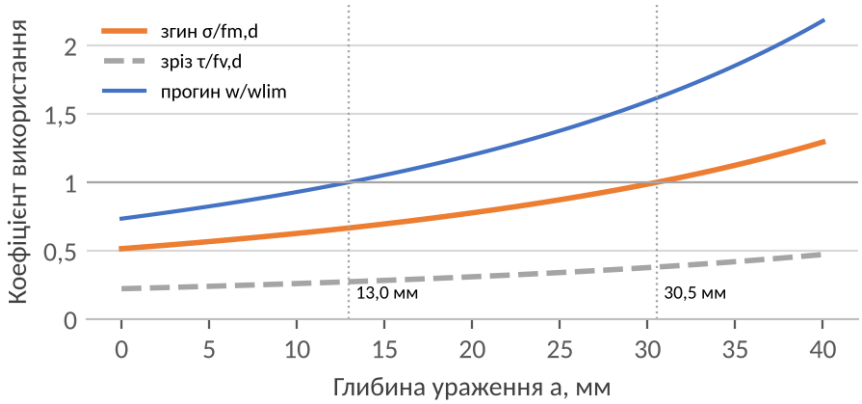

Рис. 4.6 Коефіцієнти використання балки перекриття залежно від глибини ураження гниллю (розрахунок автора)

Неушкоджена балка має значний запас міцності (коефіцієнт використання за згином 0,51, за зрізом 0,22), але її прогин уже становить 0,73 від граничного. Тому першим вичерпується граничний стан за деформаціями: допустимий прогин перевищується при глибині гнилі 13,0 мм, тоді як міцність за згином вичерпується при a = 30,5 мм, а за зрізом – лише при 63,6 мм. На практиці це означає: при $a < 13$ мм балка за умови усунення причин зволоження й антисептування може експлуатуватися далі (категорія 2); при $13 \le a < 30$ мм вона непридатна до нормальної експлуатації й потребує підсилення (категорія 3); при $a \ge 30$ мм – аварійна (категорія 4).

Для балок об'єкта на зовнішній стіні по осі А резистографія показала глибину гнилі 15–25 мм на опорних ділянках завдовжки 0,3–0,5 м, тобто вони потрапляють у категорію 3, що збігається з оцінкою за інтегральним показником Ібд (таблиця 3.3). Відносна глибина ураження $a/b = 20/180 \approx 0{,}11$ відповідає 3 балам за критерієм К2. Таблиця 4.4 може використовуватися як номограма для швидкої оцінки балок аналогічного перерізу безпосередньо на об'єкті.

4.5 Висновки до розділу 4

1) Зниження густини деструктованої деревини й підвищення її вологості впливають на теплопровідність протилежно; вологість інверсії знаку температурної аномалії залежить від глибини деструкції і становить 27, 41 і 62 % при втраті густини 20, 35 і 50 %.

2) Для умов м. Кропивницького надійне тепловізійне виявлення ураженої деревини у брусовій стіні 150 мм можливе при температурі зовнішнього повітря не вище −5 °C, зйомка – зсередини приміщень у грудні–лютому; «сліпа зона» методу при tз = −10 °C охоплює вологість 34–48 %, тому в зонах ризику обов'язкова точкова перевірка.

3) Перевірочний розрахунок балки 180×260 мм прольотом 5,4 м показав, що першим вичерпується граничний стан за прогином (гранична глибина гнилі 13,0 мм), за міцністю на згин – при 30,5 мм; ці межі використано для розмежування категорій технічного стану.

Розділ 5

ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ БІОРУЙНУВАННЯ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ

5.1 Логістична модель накопичення біологічних пошкоджень

Розглянемо дерев'яний елемент, об'єм якого прийнято за одиницю. Позначимо через x частку об'єму, зруйновану гниллю ($0 \le x \le 1$), через $(1 - x)$ – частку здорової деревини, через t – час експлуатації. Швидкість поширення ураження логічно вважати пропорційною, з одного боку, частці вже ураженої деревини (чим більше міцелію, тим більше джерел гіф і метаболічної води), а з іншого – частці ще не зруйнованої деревини (запас «живлення»). Отримуємо диференціальне рівняння, відоме як рівняння Ферхюльста:

$$dx/dt = k \cdot x \cdot (1 - x) , \qquad (5.1)$$

де k – параметр інтенсивності процесу, 1/рік, що залежить від умов зволоження, температури, породи й захисної обробки деревини.

Після розділення змінних та інтегрування маємо:

$$\int dx / [x(1 - x)] = \int k\, dt \quad \Rightarrow \quad \ln[x / (1 - x)] = k \cdot t + C , \qquad (5.2)$$

звідки розв'язок має вигляд логістичної кривої:

$$x(t) = 1 / (a \cdot e^{-k \cdot t} + 1) , \qquad (5.3)$$

де $a = e^{-C} > 0$ – параметр, що характеризує початковий стан елемента (чим більше a, тим довший інкубаційний період).

Похідна функції (5.3) і умова перегину:

$$dx/dt = a \cdot k \cdot e^{-kt} / (a \cdot e^{-kt} + 1)^2 > 0 ; \quad d^2x/dt^2 = 0 \ \text{ при } \ a \cdot e^{-kt} = 1 . \qquad (5.4)$$

Звідси момент перегину, у якому швидкість біоруйнування максимальна й дорівнює k/4, а ураження досягає 50 %:

$$t_п = \ln(a) / k . \qquad (5.5)$$

Для планування корисний також момент досягнення заданого рівня ураження x*:

$$t(x^*) = [\ln(a) - \ln(1/x^* - 1)] / k\,. \qquad (5.6)$$

Логістична крива має всі властивості, яких бракує поліноміальним моделям: вона монотонно зростає, обмежена значеннями 0 і 1, має повільну початкову стадію, фазу прискорення до точки перегину й фазу сповільнення після неї (рисунок 5.1, параметри a = 150, k = 0,07 1/рік, tп = 71,6 року).

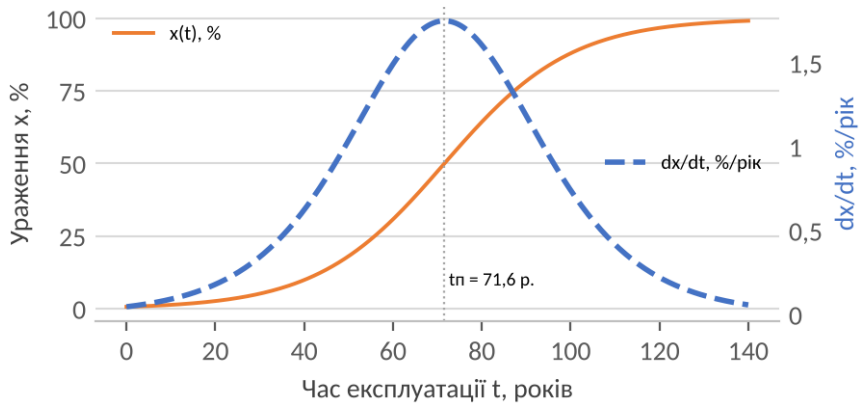

Рис. 5.1 Логістична крива біоруйнування та швидкість процесу (розрахунок автора)

Параметри a і k визначають за результатами кількох послідовних обстежень. Найпростіше рівняння (5.3) лінеаризувати: z = ln(1/x − 1) = ln(a) − k·t, після чого параметри прямої z = A + B·t знаходять методом найменших квадратів, а a = e^A, k = −B. Альтернативою є нелінійний метод найменших квадратів безпосередньо для функції (5.3). Якість апроксимації оцінюють коефіцієнтом детермінації R^2, обчисленим для вихідних (нелінеаризованих) даних.

5.2 Точність прогнозу залежно від кількості обстежень

Оскільки довгих рядів повторних обстежень дерев'яних елементів у житлових будинках регіону немає, точність методу оцінено статистичним моделюванням (методом Монте-Карло). Прийнято, що «істинний» процес описується кривою з параметрами a = 150, k = 0,07 1/рік, а обстеження виконуються кожні 5 років починаючи з 40-го року експлуатації. Кожне вимірювання має випадкову похибку з нормальним розподілом і стандартним

відхиленням 3 відсоткові пункти (в. п.), що відповідає реальній точності визначення частки ураженого перерізу резистографом і кернами. Для n = 3…7 обстежень виконано по 3000 реалізацій, у кожній визначено параметри обома способами й обчислено похибку прогнозу ураження на 80-й рік (істинне значення – 64,3 %). Результати наведено в таблиці 5.1 і на рисунку 5.2.

Таблиця 5.1

Похибка прогнозу ураження на 80-й рік залежно від кількості обстежень, в. п. (розрахунок автора)

n	Останнє обстеження, рік	СКП, лінеаризований МНК	СКП, нелінійний МНК	90 % похибок не більше
3	50	24,4	23,7	36,5
4	55	15,2	13,9	22,7
5	60	9,9	8,5	13,7
6	65	6,5	5,2	8,5
7	70	4,5	3,5	5,7

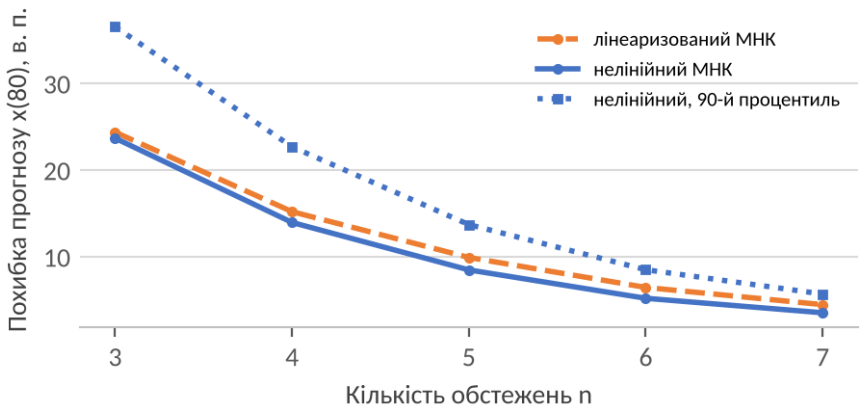

Рис. 5.2 Похибка прогнозу залежно від кількості обстежень (статистичне моделювання автора)

Моделювання показує, що прогноз за трьома обстеженнями, виконаними до точки перегину, є лише орієнтовним: середньоквадратична похибка (СКП) становить близько 24 в. п. Кожне наступне обстеження зменшує похибку приблизно в 1,5 раза, і за сімома обстеженнями СКП знижується до 3,5–4,5 в. п. Нелінійний метод найменших квадратів стабільно точніший за лінеаризований на 3–21 %, оскільки лінеаризація збільшує вагу точок із малими значеннями x.

Практичний висновок: перший прогноз слід розглядати як оцінку з широким довірчим інтервалом і уточнювати після кожного повторного обстеження; доцільно використовувати нелінійний метод і обмежувати вихідні дані діапазоном 5–95 %.

Для порівняння на рисунку 5.3 до тих самих семи точок підібрано білінійну модель «лаг + стала швидкість», покладену в основу методики TimberLife [22]. Отримано лаговий період 34,2 року і швидкість 1,25 % на рік. Усередині інтервалу даних обидві моделі майже збігаються, проте за його межами білінійна модель передбачає досягнення 100 % ураження на 114-й рік, тоді як логістична – асимптотичне наближення, тобто білінійна модель систематично завищує швидкість на пізній стадії й не описує сповільнення процесу.

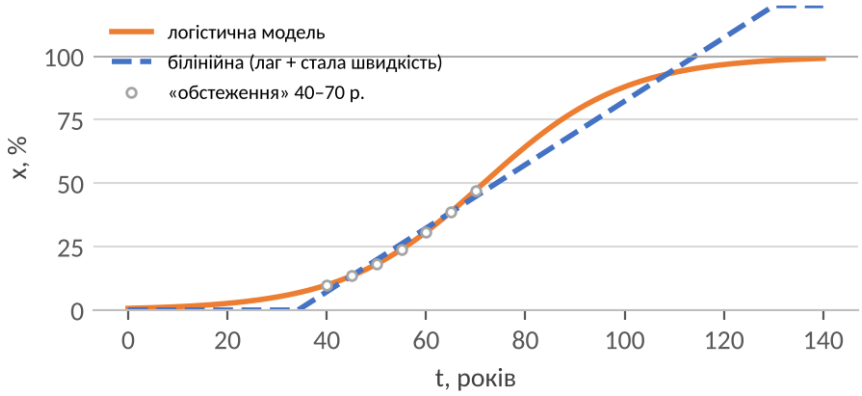

Рис. 5.3 Порівняння логістичної та білінійної моделей біоруйнування (розрахунок автора)

5.3 Вплив клімату й умов експлуатації на параметр інтенсивності

Параметр a характеризує початковий стан деревини (порода, захисна обробка, розміри), тому для деревини того самого типу його можна вважати незмінним. Параметр k характеризує інтенсивність процесу й залежить від мікроклімату елемента. Згідно з дозо-реакційною концепцією [22, 23] швидкість загнивання приблизно пропорційна накопиченій «дозі» сприятливих умов, а для перенесення інженерних моделей на інші регіони пропонується використовувати індекс Шеффера [22]. Тоді для елементів, що зволожуються атмосферною вологою, можна записати:

$$k_2 = k_1 \cdot CI_2 / CI_1 . \quad (5.7)$$

Згідно з аналізом підрозділу 2.3, реалістичні кліматичні зміни (+1 K) підвищують CI для м. Кропивницького лише на 9 %, і стільки ж зросте k. Набагато сильніше на k впливають зміни умов експлуатації, які змінюють вологість деревини: відкриття або закладання продухів, протікання, гідроізоляція ґрунту підпілля. Їх вплив кількісно оцінено в підрозділі 5.4 параметричним розрахунком.

5.4 Прогноз стану лаг підлоги об'єкта

Для лаг підлоги першого поверху модель відкалібровано за трьома значеннями ураження (частка втраченого перерізу): 10 % на 40-й рік (за даними про ремонт підлоги), 25 % на 55-й рік і 45 % на 68-й рік експлуатації (2026 р., поточне обстеження). Отримано a = 154,85, k = 0,0714 1/рік, R^2 = 0,9997; точка перегину – 70,7 року, тобто процес зараз перебуває у фазі, близькій до максимальної швидкості (рисунок 5.4). З огляду на результати підрозділу 5.2 прогноз за трьома точками має широкий довірчий інтервал і потребує уточнення наступними обстеженнями.

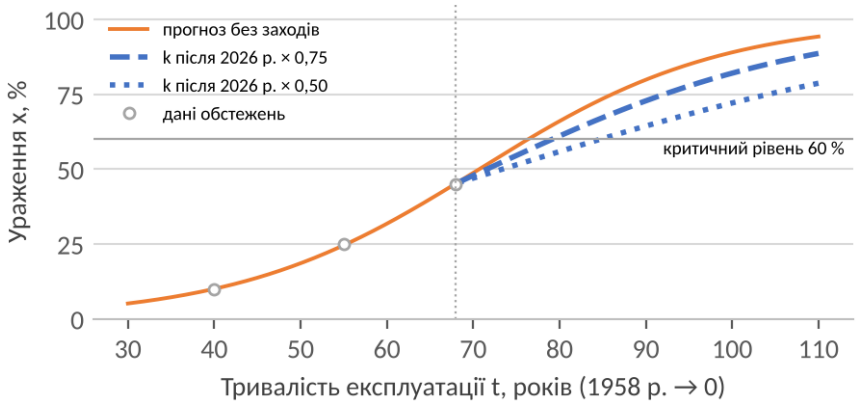

Рис. 5.4 Прогноз біоруйнування лаг підлоги першого поверху за різних сценаріїв (розрахунок автора)

За прогнозом без заходів ураження досягне 58 % у 2033 р. (75 років) і 66 % у 2038 р. (80 років). Рівня 60 %, який для лаг перерізом 80×100 мм приблизно відповідає вичерпанню несучої здатності, буде досягнуто через 76,3 року

експлуатації, тобто приблизно в 2034 р. Вплив заходів зі зниження вологості в підпіллі оцінено параметричним розрахунком: прийнято, що після 2026 р. параметр k зменшується в m разів (таблиця 5.2, рисунок 5.5).

Таблиця 5.2

Рік досягнення критичного рівня ураження лаг 60 % за різних сценаріїв (розрахунок автора)

Сценарій після 2026 р.	**Множник k**	**Рік досягнення 60 %**
Погіршення умов (додаткові протікання)	1,25	2033
Без змін	1,00	2034
Часткове відновлення провітрювання	0,75	2037
Відновлення продухів і гідроізоляція ґрунту	0,50	2043

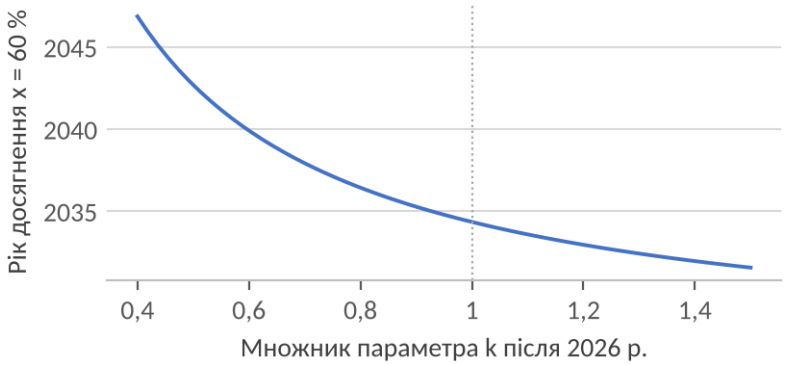

Рис. 5.5 Залежність строку досягнення критичного ураження лаг від множника параметра k (розрахунок автора)

Навіть дворазове зниження інтенсивності процесу лише відсуває критичний момент приблизно на 8 років, але не зупиняє його, оскільки вже накопичене ураження велике. Тому для лаг під санвузлами, що перебувають в аварійному стані (розділ 3), потрібна невідкладна заміна, а на решті площі заміну слід виконати протягом найближчих 6–7 років; заходи зі зниження вологості обов'язкові для нових елементів. Наступне обстеження доцільно призначити не пізніше ніж через 2–3 роки; його результат використовують для уточнення параметрів моделі.

Узагальнюючи, можна запропонувати такий порядок призначення періодичності обстежень дерев'яних елементів залежно від стадії процесу за

логістичною моделлю: до досягнення 10 % ураження – 5 років (у межах планових обстежень за ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 [1]); від 10 % до точки перегину – 2–3 роки; після точки перегину – щороку або ремонт.

5.5 Заходи з відновлення та захисту дерев'яних конструкцій

Результати діагностики мають перетворюватися на конкретні проєктні рішення. Для будинків розглянутого типу рекомендовано комплекс заходів, що відповідає ДБН В.3.2-2-2009 [24] і ДБН В.2.6-161:2017 [10].

Усунення причин зволоження – першочерговий захід, без якого будь-який ремонт дерев'яних елементів неефективний: відновлення й розширення продухів підпілля з установленням ґраток (розрахунок у підрозділі 6.4); улаштування на ґрунті підпілля пароізоляційної мембрани з перекриттям стиків або бетонної стяжки; відновлення відмостки шириною не менше 1,0 м з ухилом від будинку; ремонт водостоків; усунення протікань трубопроводів; улаштування провітрювання горища через карнизні й гребеневі продухи.

Заміна уражених елементів підлоги першого поверху. Демонтаж дощок і лаг на ділянках з категорією 3–4, видалення деревного сміття й зараженого ґрунту на глибину не менше 100 мм, обробка ґрунту й кладки стовпчиків біоцидним розчином, улаштування гідроізоляції на опорах (два шари рулонного бітумно-полімерного матеріалу), установлення нових лаг із камерно сушеної деревини ($W \le 18$ %), просоченої антисептиком глибокого просочення для класу використання 3, з вентиляційним зазором між лагою і стіною не менше 30 мм. Альтернатива – заміна дерев'яної підлоги першого поверху на бетонну по ґрунту з утепленням екструдованим пінополістиролом.

Відновлення опорних ділянок балок перекриття. При глибині гнилі до граничної за деформаціями (13 мм) – зачищення ураженої деревини до здорової, антисептування борними сполуками (препарати на основі боратів добре дифундують у вологу деревину й малотоксичні для людей), ізоляція кінця балки від кладки рулонною гідроізоляцією з повітряним зазором біля торця. При більшій глибині – протезування: видалення ураженої ділянки й установлення

накладок (дерев'яних, із клеєного бруса LVL або сталевих швелерів) з кріпленням на болтах або вклеєних стрижнях; довжина заходу накладок на здорову частину – не менше 3h. Перевірку протезованої балки виконують за [9, 10].

Захист кроквяної системи. Огляд і зачищення мауерлату та кінців крокв, антисептування й вогнебіозахисна обробка, заміна уражених ділянок мауерлату, установлення гідроізоляційної підкладки між мауерлатом і кладкою, улаштування підпокрівельної дифузійної мембрани та вентиляційного зазору під покрівлею при її заміні.

Профілактичне обслуговування й моніторинг. Після ремонту в паспорті будинку фіксують контрольні точки для повторних вимірювань вологості й, за можливості, встановлюють датчики вологості деревини в найризикованіших місцях (під санвузлами, на опорах балок по північному фасаду). Досвід моніторингу дерев'яних конструкцій [20] показує, що навіть прості резистивні датчики вологості з реєстрацією даних дають змогу вчасно виявити протікання й порушення провітрювання. Повторні обстеження виконують з періодичністю, визначеною за логістичною моделлю (підрозділ 5.4).

5.6 Висновки до розділу 5

1) Логістична модель x(t) = 1/(a·e^(−kt) + 1), що випливає з рівняння Ферхюльста, адекватно описує стадійний характер біоруйнування і, на відміну від поліномів і білінійної моделі, не втрачає фізичного змісту за межами інтервалу даних.

2) Статистичне моделювання показало, що похибка прогнозу зменшується з 24 в. п. за трьох обстежень до 3,5–4,5 в. п. за семи; нелінійний метод найменших квадратів точніший за лінеаризований.

3) Реалістичне потепління на 1 K підвищує параметр інтенсивності k для атмосферно зволожуваних елементів лише приблизно на 9 %, тоді як умови експлуатації (провітрювання, протікання) впливають на нього значно сильніше.

4) Прогноз для лаг підлоги об'єкта показує досягнення критичного рівня ураження 60 % приблизно в 2034 р.; навіть дворазове зниження інтенсивності процесу відсуває цей момент лише до 2043 р.; рекомендовано невідкладну заміну на ділянках під мокрими приміщеннями й повторне обстеження через 2–3 роки.

Розділ 6
ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Загальні положення

Технічне обстеження старих будинків з дерев'яними конструкціями належить до робіт з підвищеною небезпекою: воно виконується в умовах, коли несуча здатність елементів невідома, частина конструкцій може перебувати в аварійному стані, доступ до них ускладнений, а в підпіллях і на горищах можливий контакт із біологічно активним середовищем. Організація робіт ґрунтується на Законі України «Про охорону праці» [32], ДБН А.3.2-2-2009 [33], Правилах охорони праці під час виконання робіт на висоті [34], Правилах безпечної експлуатації електроустановок споживачів [35] і Правилах пожежної безпеки в Україні [36].

До обстеження допускаються особи віком від 18 років, що пройшли медичний огляд, вступний і первинний інструктажі на робочому місці, навчання й перевірку знань з питань охорони праці, а для робіт на висоті – спеціальне навчання. Роботи в підпіллях, на горищах і на покрівлі виконуються бригадою не менше ніж із двох осіб. На роботи на висоті понад 1,3 м за відсутності огорож і на роботи в замкнутих просторах (підпілля висотою менше 1,0 м) оформлюється наряд-допуск. Відповідальною за безпечне виконання робіт є особа, призначена наказом організації, що виконує обстеження.

6.2 Небезпечні та шкідливі виробничі чинники

Чинники, характерні для обстеження будинків з дерев'яними конструкціями, наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

Небезпечні й шкідливі чинники під час обстеження дерев'яних конструкцій

Чинник	Джерело, вид робіт	Можливі наслідки
Обвалення конструкцій	Перекриття й підлоги в аварійному стані, розкриття вузлів, сходи з ураженими косоурами	Травми, загибель

Чинник	Джерело, вид робіт	Можливі наслідки
Падіння з висоти	Робота з драбин, на горищі по балках, на покрівлі	Переломи, травми голови
Падіння предметів	Відпадання штукатурки, засипки, інструменту під час розкриттів	Травми голови, очей
Біологічний чинник (спори грибів, пліснява)	Підпілля, горища, ділянки з активною гниллю	Алергічні реакції, подразнення дихальних шляхів
Пил (деревний, шлаковий, азбестовмісний)	Розкриття засипки перекриттів, огляд азбестоцементної покрівлі	Захворювання органів дихання
Обмежений простір, недостатнє освітлення	Підпілля висотою 0,6 м, горища	Травми, перевтома
Ураження електричним струмом	Стара електропроводка в перекриттях, переносні прилади	Електротравми
Гострі кромки, цвяхи	Розкриття дощок підлоги, обшивки	Порізи, проколи
Низька температура повітря	Тепловізійне обстеження взимку	Переохолодження
Пожежна небезпека	Суха деревина горищ, газові котли	Опіки, отруєння продуктами горіння
Хімічні речовини	Індикатори, антисептики	Подразнення шкіри й очей

6.3 Заходи безпеки під час виконання робіт

Перед початком робіт керівник обстеження за результатами попереднього огляду визначає зони, перебування в яких небезпечне (провисання перекриттів, просідання підлоги, тріщини в кладці біля опор), огороджує їх сигнальною стрічкою і за потреби вимагає встановлення тимчасових стояків-підпор до проведення детального обстеження. Пересування по ураженій підлозі й горищних перекриттях виконується лише по ходових трапах, покладених на балки, а не по засипці чи накату. Основні заходи щодо кожної групи чинників зведено в таблицю 6.2.

Таблиця 6.2

Заходи з охорони праці під час обстеження

Група чинників	Заходи
Обвалення, падіння предметів	Виділення й огородження небезпечних зон, тимчасові підпори, ходові трапи, каски, заборона перебування під ділянками розкриття

Група чинників	Заходи
Робота на висоті	Драбини з нековзними опорами під кутом 70–75°, страхувальні системи на висоті понад 1,3 м, вихід на покрівлю лише без ожеледі й при вітрі до 10 м/с [34]
Біологічний чинник і пил	Респіратори FFP2, окуляри, рукавиці, окремий спецодяг; провітрювання підпілля перед входом (підрозділ 6.4); азбестоцементні елементи не ламати й не свердлити
Електробезпека	З'ясування траси прихованої проводки, знеструмлення ділянки; переносні світильники в підпіллях не вище 12 В; інструмент класу II або через ПЗВ 30 мА [35]
Пожежна безпека	Заборона відкритого вогню й паління на горищах і в підпіллях, вогнегасник у бригаді, закриття отворів біля димоходів негорючими матеріалами [36]
Мікроклімат	Обмеження безперервної роботи на холоді нижче −10 °С, перерви на обігрів, утеплений спецодяг
Обмежений простір	Наряд-допуск, наглядач біля входу, контроль повітря газоаналізатором (CH_4, CO, O_2), освітлення (підрозділ 6.4)

Підпілля висотою 0,6 м із вологим ґрунтом і металевими трубопроводами за умовами ураження струмом належить до особливо небезпечних приміщень, тому застосування переносних світильників напругою 220 В у ньому неприпустиме. Тепловізори, вологоміри й резистографи живляться від власних акумуляторів. Засоби індивідуального захисту бригади: захисні каски, спецодяг і спецвзуття із захистом носка й антипрокольною устілкою, рукавиці, окуляри, респіратори FFP2, страхувальні прив'язі, налобні ліхтарі; на об'єкті – аптечка першої допомоги.

6.4 Розрахунок провітрювання підпілля та освітлення робочого місця

Найнебезпечнішою частиною обстеження є робота в технічному підпіллі висотою 0,6 м. Повітря закритого підпілля з активними вогнищами гниття містить підвищену концентрацію спор грибів, вологи, продуктів метаболізму (CO_2) і пилу, а за наявності газових мереж можливий витік газу. Тому вхід дозволяється лише після провітрювання, тривалість якого визначається розрахунком. Друга умова безпечної роботи – достатнє штучне освітлення від переносних світильників напругою 12 В.

Вихідні дані. Об'єм підпілля $V_п = 26{,}4 \cdot 11{,}6 \cdot 0{,}6 = 183{,}7$ м³. У цоколі влаштовано 12 продухів 150×150 мм (площа одного $f = 0{,}0225$ м²), по 6 на

навітряному й завітряному фасадах. Розрахункові умови обстеження (грудень–лютий): температура зовнішнього повітря tз = −5 °С, повітря підпілля tп = +5 °С, швидкість вітру v = 3 м/с; різниця висот центрів продухів і середини підпілля h = 0,35 м. Розрахункову схему показано на рисунку 6.1.

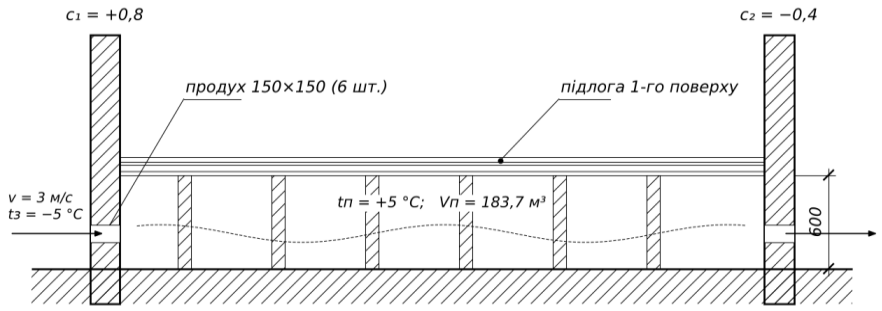

Рис. 6.1 Схема природного провітрювання підпілля через продухи (схема автора)

Тепловий (гравітаційний) тиск:

$$\Delta p_т = g \cdot h \cdot (\rho_з - \rho_п) , \quad \rho = 353/(273 + t) ; \tag{6.1}$$

$$\Delta p_т = 9{,}81 \cdot 0{,}35 \cdot (1{,}317 - 1{,}270) = 0{,}163 \text{ Па} . \tag{6.2}$$

Вітровий тиск при аеродинамічних коефіцієнтах навітряного (+0,8) і завітряного (−0,4) фасадів [26]:

$$\Delta p_в = 0{,}5 \cdot \rho_з \cdot v^2 \cdot (c_1 - c_2) = 0{,}5 \cdot 1{,}317 \cdot 3^2 \cdot (0{,}8 + 0{,}4) = 7{,}11 \text{ Па} . \tag{6.3}$$

Припливні й витяжні продухи працюють послідовно, тому еквівалентна площа й витрата повітря:

$$A_{екв} = 1/\sqrt{(1/A_{пр}^2 + 1/A_{вит}^2)} = 1/\sqrt{(2/0{,}135^2)} = 0{,}0955 \text{ м}^2 ; \tag{6.4}$$

$$L = \mu \cdot A_{екв} \cdot \sqrt{(2 \cdot \Delta p/\rho_з)} \cdot 3600 , \quad \mu = 0{,}6 . \tag{6.5}$$

При вітрі (Δр = Δрв + Δрт) L = 685 м³/год, кратність повітрообміну n = L/Vп = 3,73 год⁻¹. У безвітряну погоду (Δр = Δрт) L = 102 м³/год, n = 0,56 год⁻¹.

Тривалість провітрювання. За умови повного перемішування концентрація шкідливої домішки після відкриття продухів зменшується експоненційно. Для зниження концентрації в 10 разів потрібний час:

$$\tau = (V_п/L)\cdot\ln(C_0/C) = (V_п/L)\cdot\ln 10 \,. \qquad (6.6)$$

При вітрі 3 м/с τ = 37 хв; у безвітряну погоду τ = 248 хв, тобто понад 4 год, що неприйнятно. Тому в безвітряну погоду підпілля необхідно провітрювати примусово переносним вентилятором продуктивністю 1000 м³/год, установленим у продусі на витяжку:

$$\tau = 60\cdot V_п\cdot\ln 10 \,/\, (L_{вент} + L_т) = 60\cdot 183{,}7\cdot 2{,}303 \,/\, (1000 + 102) = 23 \text{ хв} \,. \qquad (6.7)$$

Приймаємо: провітрювання підпілля перед входом – не менше 40 хв при вітрі не менше 3 м/с або не менше 25 хв з вентилятором; вентилятор працює й під час перебування людей у підпіллі; перед входом виконується контроль повітря газоаналізатором. Залежність тривалості провітрювання від швидкості вітру показано на рисунку 6.2.

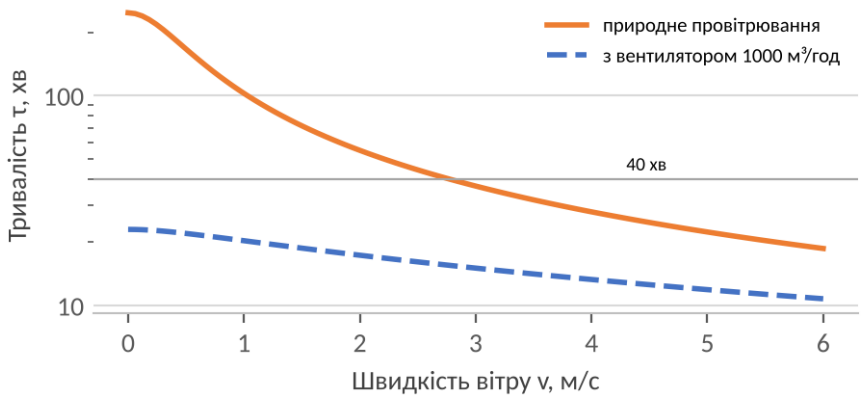

Рис. 6.2 Тривалість провітрювання підпілля залежно від швидкості вітру (розрахунок автора)

Перевірка площі продухів. За вимогами Міжнародного кодексу житлових будинків [37] сумарна чиста площа продухів має бути не менше 1/150 площі підпілля, а за наявності пароізоляційного покриття ґрунту – не менше 1/1500. Для об'єкта (площа підпілля 306,2 м²) це 2,04 м² без пароізоляції і 0,204 м² з нею, тоді як фактична площа становить 0,270 м². Отже, без покриття ґрунту продухів недостатньо в 7,6 раза, що є однією з причин зволоження деревини підлоги (розділ 3); улаштування пароізоляційної мембрани на ґрунті підпілля (підрозділ

5.5) приводить існуючі продухи у відповідність вимогам навіть без їх розширення.

Освітлення робочого місця. Для огляду конструкцій, зчитування показів приладів і розмітки точок відбору проб приймаємо нормовану освітленість на поверхні конструкції Ен = 50 лк, достатню для розрізнення тріщин, ознак гнилі та шкал приладів (метод розрахунку – точковий, відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 [38]), коефіцієнт запасу Кз = 1,3. Застосовується переносний світлодіодний світильник 12 В зі світловим потоком Ф = 900 лм і косинусним розподілом сили світла; сила світла по осі:

$$I_0 = \Phi/\pi = 900/3{,}14 = 286 \text{ кд} . \quad (6.8)$$

Освітленість у точці за точковим методом:

$$E = I_\alpha \cdot \cos\alpha / (r^2 \cdot K_з) , \quad I_\alpha = I_0 \cdot \cos\alpha . \quad (6.9)$$

При нормальному падінні світла (α = 0) освітленість на відстані 1 м становить 220 лк, на відстані 2 м – 55 лк. Гранична відстань від світильника до поверхні, за якої виконується умова E ≥ Ен: $r = \sqrt{(I_0/(Ен \cdot Кз))} = 2{,}10$ м; при падінні світла під кутом 45° – 1,48 м (рисунок 6.3). Оскільки в підпіллі висотою 0,6 м конструкції оглядаються з відстані до 1,5 м, достатньо одного світильника на працівника, переміщуваного разом із ним, і налобного ліхтаря як резервного джерела.

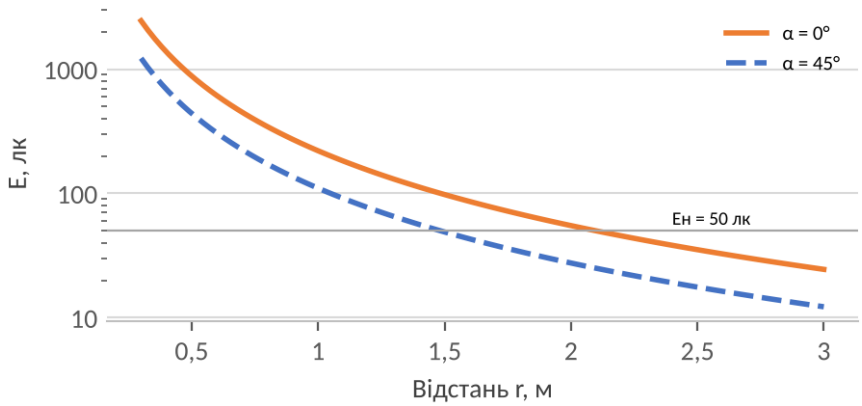

Рис. 6.3 Освітленість поверхні конструкції залежно від відстані до світильника (розрахунок автора)

6.5 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Відповідно до Кодексу цивільного захисту України [39] організація, що виконує обстеження, повинна передбачити дії працівників у разі виникнення надзвичайних ситуацій. Для обстеження житлових будинків в умовах воєнного стану найбільш імовірними є такі ситуації: сигнал повітряної тривоги, раптове обвалення аварійної конструкції, пожежа, витік газу.

Перед початком робіт керівник бригади з'ясовує розташування найближчої захисної споруди цивільного захисту або найпростішого укриття, що відповідає ДБН В.2.2-5:2023 [40], і маршрут до неї. Підпілля висотою 0,6 м і горище не можуть використовуватися як укриття. За сигналом «Повітряна тривога» роботи негайно припиняють, працівники виходять із підпілля, горища чи з покрівлі, знеструмлюють і залишають обладнання в безпечному місці та прямують до укриття; роботи відновлюють лише після сигналу відбою.

У разі ознак раптового руйнування (тріск, прогресуюче провисання, осипання засипки) роботи припиняють, людей виводять із небезпечної зони, мешканців попереджають, а про загрозу обвалення повідомляють керуючу організацію та за потреби службу 101. У разі запаху газу роботи зупиняють, не вмикають і не вимикають електроприлади, відчиняють продухи й двері та викликають аварійну газову службу (104). Про виявлений аварійний стан конструкцій (категорія 4) керівник обстеження письмово повідомляє власника будинку з вимогою обмежити доступ до небезпечних ділянок до виконання протиаварійних заходів.

6.6 Висновки до розділу 6

1) Визначено одинадцять небезпечних і шкідливих чинників, характерних для обстеження будинків з дерев'яними конструкціями, з яких найнебезпечнішими є обвалення аварійних конструкцій, падіння з висоти та біологічний чинник; для кожної групи чинників розроблено заходи захисту.

2) Розрахунком встановлено, що підпілля об'єкта перед входом необхідно провітрювати не менше 40 хв при вітрі або 25 хв із переносним вентилятором 1000 м³/год (природне провітрювання в штиль триває понад 4 год).

3) Фактична площа продухів у 7,6 раза менша за потрібну без пароізоляції ґрунту, але достатня після влаштування пароізоляційної мембрани; переносний світильник 900 лм забезпечує освітленість 50 лк на відстані до 2,1 м.

4) Розроблено порядок дій бригади в надзвичайних ситуаціях, зокрема за сигналом повітряної тривоги.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі розроблено методичний підхід до діагностики та кількісної оцінки технічного стану дерев'яних конструкцій малоповерхових будівель за критеріями біологічної деструкції. Основні результати такі.

1) Проаналізовано механізми біологічної деструкції деревини та методи її виявлення. Найнебезпечнішою для конструкцій з хвойних порід є бура гниль, яка знижує міцність на згин на 40–70 % уже при втраті маси 5–10 %. Жоден окремий метод діагностики не поєднує високої продуктивності з кількісною оцінкою, тому обґрунтовано двоступеневу схему обстеження, що відповідає європейським настановам; резистограф забезпечує 85–100 % збігу з лабораторними даними.

2) Систематизовано чинні нормативні документи у сфері обстеження й довговічності дерев'яних конструкцій. Кліматичний індекс загнивання Шеффера для м. Кропивницького становить 20,6 (низький потенціал); індекс утричі чутливіший до кількості днів з опадами, ніж до потепління.

3) Розроблено програму обстеження та систему з п'яти критеріїв біологічної деструкції з інтегральним показником Ібд, пов'язаним із категоріями технічного стану за ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016; результат стійкий до зміни ваг критеріїв на ±0,05. На прикладі двоповерхового будинку 1958 р. виявлено аварійний стан підлоги над підпіллям (Ібд = 3,35) при загальному фізичному зносі будинку лише 38 %, що доводить необхідність поелементної оцінки.

4) Теплотехнічним розрахунком показано, що вологість інверсії знаку температурної аномалії над ураженою деревиною залежить від втрати густини (27, 41 і 62 % при $\Delta\rho$ = 20, 35 і 50 %). Визначено умови надійного тепловізійного обстеження в м. Кропивницькому (температура зовнішнього повітря не вище −5 °С, зйомка зсередини приміщень у грудні–лютому) і «сліпу зону» методу (34–48 % вологості при $t_з$ = −10 °С).

5) Розрахунком балки перекриття 180×260 мм прольотом 5,4 м встановлено граничну глибину гнилі 13,0 мм за прогином і 30,5 мм за міцністю на згин; складено таблицю-номограму для оцінки балок на об'єкті й розмежування категорій технічного стану.

6) Досліджено логістичну модель біоруйнування. Статистичним моделюванням показано зменшення похибки прогнозу з 24 до 3,5–4,5 в. п. при збільшенні кількості обстежень з трьох до семи. Прогноз для лаг підлоги об'єкта показує досягнення критичного рівня ураження 60 % приблизно в 2034 р.; навіть дворазове зниження інтенсивності процесу відсуває цей момент лише до 2043 р.

7) Розроблено комплекс заходів з відновлення та захисту дерев'яних конструкцій і заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час обстеження, з розрахунком тривалості провітрювання підпілля (40 хв при вітрі або 25 хв із вентилятором) і освітлення робочого місця.

8) Результати можуть бути використані експертними й проєктними організаціями під час обстеження старого житлового фонду та в навчальному процесі. Подальші дослідження доцільно спрямувати на накопичення регіональних даних повторних обстежень і закладання полігонних випробувань деревини в центральній Україні для уточнення параметрів прогнозної моделі.

GENERAL CONCLUSIONS

The thesis develops a method for diagnosing and quantitatively assessing the technical condition of timber structures in low-rise buildings by biological deterioration criteria. The main results are as follows.

1) The mechanisms of wood biodeterioration and the methods of its detection were analysed. Brown rot is the most dangerous decay type for softwood members: it reduces bending strength by 40–70 % at a mass loss of only 5–10 %. No single diagnostic method combines high productivity with quantitative assessment, so a two-stage inspection scheme consistent with European guidelines was justified; the resistance drill agrees with laboratory data in 85–100 % of cases.

2) The current Ukrainian codes for inspection and durability of timber structures were systematised. The Scheffer decay climate index for Kropyvnytskyi equals 20.6 (low decay potential); the index is three times more sensitive to the number of rainy days than to warming.

3) An inspection programme and a system of five biodeterioration criteria with an integral index Ібд linked to the condition categories of DSTU-N B V.1.2-18:2016 were developed; the result is robust to a ±0.05 change of the criteria weights. For a two-storey house built in 1958, the floor above the crawl space was found to be in an emergency condition (Ібд = 3.35), while the overall physical wear of the building is only 38 %, which proves the need for element-by-element assessment.

4) Heat-transfer analysis showed that the moisture content at which the surface temperature anomaly above decayed wood changes sign depends on the density loss (27, 41 and 62 % at density losses of 20, 35 and 50 %). The conditions for reliable infrared inspection in Kropyvnytskyi (outdoor temperature not above −5 °C, indoor survey in December–February) and the "blind zone" of the method (34–48 % moisture content at −10 °C) were determined.

5) The check of a 180×260 mm floor beam with a 5.4 m span gave a limiting decay depth of 13.0 mm for deflection and 30.5 mm for bending strength; a design chart for on-site assessment and for separating condition categories was compiled.

6) The logistic decay model was studied. Monte Carlo simulation showed that the forecast error decreases from 24 to 3.5–4.5 percentage points when the number of surveys increases from three to seven. For the floor joists of the building, the critical damage level of 60 % is expected around 2034; even halving the decay rate postpones it only to 2043.

7) Repair and protection measures for timber members, occupational safety measures and emergency procedures for the inspection team were developed, including the calculation of crawl-space ventilation time (40 min with wind or 25 min with a fan) and working-place lighting.

8) The results can be used by expert and design organisations when inspecting the old housing stock and in teaching. Further research should collect regional data from repeated inspections and establish field tests of wood in central Ukraine to refine the parameters of the forecasting model.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. [Чинний від 2017-04-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 44 с.

2. Cruz H., Yeomans D., Tsakanika E., Macchioni N., Jorissen A., Touza M., Mannucci M., Lourenço P. B. Guidelines for on-site assessment of historic timber structures. International Journal of Architectural Heritage. 2015. Vol. 9, No. 3. P. 277–289. DOI: 10.1080/15583058.2013.774070.

3. Assessment of timber structures : COST Action E55 «Modelling of the performance of timber structures» / ed. by P. Dietsch, J. Köhler. Aachen : Shaker Verlag, 2010. 137 p.

4. Wood handbook – wood as an engineering material : General Technical Report FPL-GTR-282. Madison : USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021. 543 p.

5. Schmidt O. Wood and tree fungi: biology, damage, protection, and use. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2006. 334 p.

6. Wilcox W. W. Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength. Wood and Fiber. 1978. Vol. 9, No. 4. P. 252–257.

7. EN 350:2016. Durability of wood and wood-based products – Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials. Brussels : CEN, 2016. 67 p.

8. EN 335:2013. Durability of wood and wood-based products – Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products. Brussels : CEN, 2013. 15 p.

9. 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). [Чинний від 2013-07-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2012. 110 с.

10. ДБН В.2.6-161:2017. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. [Чинні від 2017-08-01]. Київ : Мінрегіон України, 2017. 111 с.

11. Viitanen H., Vinha J., Salminen K., Ojanen T., Peuhkuri R., Paajanen L., Lähdesmäki K. Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures. Journal of Building Physics. 2010. Vol. 33, No. 3. P. 201–224. DOI: 10.1177/1744259109343511.

12. Ross R. J., Brashaw B. K., Wang X. Structural condition assessment of in-service wood. Forest Products Journal. 2006. Vol. 56, No. 6. P. 4–8.

13. Henriques D. F., Nunes L., Machado J. S., de Brito J. Timber in buildings: estimation of some properties using Pilodyn® and Resistograph® : proceedings of the XII International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC). Porto, 2011.

14. Hashim M. H. M., Amin N. M., Noh N. I. F. M., Abdullah N. H., Ghani N. I. A. Towards a standardized moisture content classification for timber defect assessment: a review and framework for condition-based maintenance : preprint. Preprints.org. 2026. DOI: 10.20944/preprints202605.0796.v1.

15. In situ assessment of structural timber : State of the art report of the RILEM Technical Committee 215-AST / ed. by B. Kasal, T. Tannert. Dordrecht : Springer, 2010. 124 p. (RILEM State of the Art Reports ; vol. 7).

16. Costello L. R., Quarles S. L. Detection of wood decay in blue gum and elm: an evaluation of the Resistograph® and the portable drill. Journal of Arboriculture. 1999. Vol. 25, No. 6. P. 311–318.

17. Timber bridge maintenance manual. Appendix D: Non-destructive testing. Brisbane : Queensland Department of Main Roads, 2005. URL: https://www.tmr.qld.gov.au (дата звернення: 03.10.2026).

18. Nondestructive evaluation of wood. Second edition : General Technical Report FPL-GTR-238 / ed. by R. J. Ross. Madison : USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 2015. 169 p.

19. Imposa S., Mele G., Corrao M., Coco G., Battaglia G. Characterization of decay in the wooden roof of the S. Agata church of Ragusa Ibla (Southeastern Sicily) by means of sonic tomography and resistograph penetration tests. International Journal

of Architectural Heritage. 2014. Vol. 8, No. 2. P. 213–223. DOI: 10.1080/15583058.2012.685924.

20. Palma P., Steiger R. Structural health monitoring of timber structures – review of available methods and case studies. Construction and Building Materials. 2020. Vol. 248. Art. 118528. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118528.

21. Keshmiry A., Hassani S., Mousavi M., Dackermann U. Effects of environmental and operational conditions on structural health monitoring and non-destructive testing: a systematic review. Buildings. 2023. Vol. 13, No. 4. Art. 918. DOI: 10.3390/buildings13040918.

22. van Niekerk P. B., Brischke C., Niklewski J. Estimating the service life of timber structures concerning risk and influence of fungal decay – a review of existing theory and modelling approaches. Forests. 2021. Vol. 12, No. 5. Art. 588. DOI: 10.3390/f12050588.

23. Brischke C., Rapp A. O. Dose–response relationships between wood moisture content, wood temperature and fungal decay determined for 23 European field test sites. Wood Science and Technology. 2008. Vol. 42, No. 6. P. 507–518. DOI: 10.1007/s00226-008-0191-7.

24. ДБН В.3.2-2-2009. Житлові будинки. Реконструкція та капітальний ремонт. [Чинні від 2010-01-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 67 с.

25. EN 338:2016. Structural timber – Strength classes. Brussels : CEN, 2016. 18 p.

26. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. [Чинні від 2007-01-01]. Київ : Мінбуд України, 2006. 75 с.

27. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. [Чинний від 2011-11-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.

28. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. [Чинні від 2022-09-01]. Київ : Мінрегіон України, 2022. 23 с.

29. ДСТУ Б EN 13187:2011. Теплові характеристики будівель. Якісне виявлення теплових порушень в огороджувальних конструкціях. Інфрачервоний метод (EN 13187:1998, IDT). Київ : Мінрегіон України, 2012.

30. Суханов В. Г., Вировий В. М., Суханова С. В. Методичні вказівки для виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Оцінка технічного стану будівель і розробка експертних висновків (науково-технічних звітів)». Одеса : ОДАБА, 2019. URL: https://odaba.edu.ua/upload/files/MV_RGR_Otsinka_tehnichnogo_stanu.pdf (дата звернення: 14.09.2026).

31. Scheffer T. C. A climate index for estimating potential for decay in wood structures above ground. Forest Products Journal. 1971. Vol. 21, No. 10. P. 25–31.

32. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12 (дата звернення: 22.09.2026).

33. ДБН А.3.2-2-2009. Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. [Чинні від 2012-04-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2012. 116 с.

34. НПАОП 0.00-1.15-07. Правила охорони праці під час виконання робіт на висоті : затв. наказом Держгірпромнагляду від 27.03.2007 № 62. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0396-07 (дата звернення: 17.10.2026).

35. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : затв. наказом Держнаглядохоронпраці від 09.01.1998 № 4. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98 (дата звернення: 08.09.2026).

36. Правила пожежної безпеки в Україні : затв. наказом МВС України від 30.12.2014 № 1417. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15 (дата звернення: 29.10.2026).

37. International Residential Code for one- and two-family dwellings. Section R408: Under-floor space. Country Club Hills : International Code Council, 2021.

38. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. [Чинні від 2019-03-01]. Київ : Мінрегіон України, 2018. 133 с.

39. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 № 5403-VI. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17 (дата звернення: 11.10.2026).

40. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. [Чинні від 2023-09-01]. Київ : Мінрозвитку, 2023.