

**RECONSTRUCTION OF ENGINEERING NETWORKS
AND EQUIPMENT IN THE CONTEXT
OF THE RECONSTRUCTION OF UKRAINE**

**РЕКОНСТРУКЦІЯ ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖ
ТА ОБЛАДНАННЯ В КОНТЕКСТІ ВІДБУДОВИ УКРАЇНИ**

Oksana Dobrovolska¹

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-631-7-6>

Abstract. *Purpose:* the purpose of this study is to develop conceptual foundations for the reconstruction of non-residential and damaged buildings and the modernization of water supply networks in Ukraine, emphasizing the application of energy-efficient technologies and renewable energy sources within the framework of post-war recovery. *Methodology:* the research employs a comprehensive methodological framework, including a systems approach, comparative-analytical review of international reconstruction experience, historical-retrospective methods, techno-economic analysis, on-site inspections, graphical modeling, and engineering system simulations. This integrated approach allows for the assessment of energy performance, technical condition, engineering solutions, and modernization scenarios on the effectiveness of reconstruction. *Results:* the study identifies optimal approaches to the reconstruction of non-residential buildings, illustrated through a case study. Heating system options – including heat pumps, electric boilers, solid-fuel boilers, and solar power plants – were analyzed and compared from a techno-economic perspective. Findings indicate that heat pumps provide the most effective long-term solution. Water transportation networks were also examined as energy-intensive critical infrastructure, with emergency operating modes simulated and their impact on energy consumption evaluated. *Practical Implications:* the results provide evidence-based guidance for decision-making in the reconstruction of critical infrastructure. The study informs the selection of energy-efficient

¹ Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Urban Construction and Architecture,
Zaporizhzhia National University, Ukraine

technologies and system designs, supporting resilient, sustainable, and safe infrastructure restoration in post-conflict conditions. *Value/Originality*: this research offers a novel integration of innovative engineering technologies, energy-efficient solutions, and structural infrastructure rehabilitation strategies. It provides a scientific basis for policy and technical decision-making in post-war reconstruction, contributing to Ukraine's sustainable development and energy independence.

1. Вступ

Повномасштабна війна в Україні спричинила безпрецедентні за масштабами руйнування житлової, комунальної та критичної інфраструктури. Вибухові навантаження, що виникають унаслідок ракетних ударів, артилерійських обстрілів, детонації боеприпасів і дронів атак, породжують специфічні типи пошкоджень конструкцій, які суттєво відрізняються від традиційних техногенних впливів. Деформації вибухового походження, руйнування, локальні зосереджені обвалення, термічні ураження та динамічне розтріскування створюють складний спектр ушкоджень, що потребує спеціальних методів фіксації, діагностики та проектного опрацювання.

Разом із тим чинні будівельні норми України досі не повною мірою враховують характер вибухових руйнувань, їх каскадну дію та поєднання механічних і термічних уражень. Не враховуються порушення ґрунтової основи під впливом вибухів, поведінка бетону при короткочасному імпульсному навантаженні, локальні втрати матеріалу, термічне послаблення металевих елементів. Так проєктні положення [1, розділ 6] не включають вимог щодо реконструкції будинків після вибухів чи масових руйнувань, підсилення будівельних конструкцій розглядається лише для типових пошкоджень (корозія, перевантаження, зношення), але не адаптовані для об'єктів, які зазнали вибухових впливів [2]. В документі [3, розділ 11] вказуються собливості моніторингу аварійних станів об'єктів внаслідок вибухових дій. Відбудова розпочалася ще в перші місяці війни й триває попри нові ураження інфраструктури. Її ефективність визначає здатність держави забезпечити функціонування житлових районів, об'єктів водопостачання та інших систем життєзабезпечення. Для цього необхідно сформувати актуальну нормативну базу, забезпечити прозорість рішень

і визначити ключові напрями відновлення: розмінування територій, розчищення завалів, відновлення комунікацій, житла та мереж транспортування води.

Історичний досвід демонструє, що тимчасові рішення можуть перетворитися на довготривалі. Так сталося з панельними будинками 1950-х років, які були запроектовані як тимчасове житло, але експлуатуються й нині, попри на недостатню енергоефективність. Сучасна відбудова має ґрунтуватися на принципах енергоощадності та раціонального використання ресурсів, щоб уникнути повторення цих помилок.

Важливу роль відіграє й концепція найкращих доступних технологій, яка понад три десятиліття застосовується у країнах ЄС і нині впроваджуються в Україні в межах євроінтеграційних зобов'язань. Її використання у відновленні об'єктів цивільної інженерії сприятиме одночасному зменшенню екологічного навантаження та підвищенню ефективності інженерних систем.

Екологічні проблеми, характерні для східних регіонів України ще до 2022 року, сьогодні загострилися. Масштабне затоплення шахт та просідання ґрунту становлять загрозу для будівель і мереж водопостачання [4, с. 46], а на території більшості громад Запорізької області зберігається дефіцит якісної питної води [5, с. 33]. Це потребує переосмислення підходів до реконструкції систем транспортування води та модернізації очисних споруд.

Метою дослідження є розроблення загальних концепцій реконструкції мереж транспортування води та пошкоджених будівель із застосуванням енергоефективних технологій і відновлюваних джерел енергії. Для досягнення цієї мети визначено такі завдання:

- аналіз міжнародного та українського досвіду відновлення зруйнованих будівель і інженерної інфраструктури;
- формування ключових етапів реконструкції нежитлових і пошкоджених об'єктів;
- визначення принципів застосування енергоефективних і енергоощадних технологій.

У дослідженні використано такі методи:

- системний підхід – для розгляду інфраструктурних об'єктів як частини інтегрованих міських систем;

- порівняльно-аналітичний метод – для вивчення міжнародного досвіду післявоєнної відбудови;
- історико-ретроспективний аналіз – для простеження еволюції реконструкційних підходів у різні історичні періоди;
- техніко-економічний аналіз – для оцінки ефективності запропонованих інженерних рішень;
- методи моделювання та прогнозування – для розвитку проєктних концепцій реконструкції мереж і використання відновлюваних джерел енергії.

Логіка подання матеріалу в монографії передбачає послідовний перехід від загальної характеристики проблеми та нормативно-технічних обмежень до аналізу міжнародного досвіду, опрацювання методологічних рішень і формування практичних рекомендацій щодо реконструкції інженерних систем.

Враховуючи наведені виклики та необхідність формування сучасних підходів до відбудови, доцільним є детальне вивчення досвіду відновлення інфраструктури в різних країнах світу, що і становить зміст наступного розділу.

2. Аналіз досвіду відновлення інфраструктури після війни

За оцінками Світового банку та Міністерства економіки України, для післявоєнного відновлення країни необхідно щонайменше 411 мільярдів доларів [6, с. 1]. Основні пріоритети включають відбудову критичної інфраструктури, житлового фонду, а також ключових соціальних і транспортних об'єктів. Ефективне планування цього процесу потребує опори на міжнародний досвід післявоєнної відбудови та врахування світових практик стратегічного планування, рекомендованих для України [7, с. 27].

Наприклад, в Іраку уряд спільно з громадськими організаціями ініціював розроблення схем реконструкції житлових кварталів, основну увагу було зосереджено на соціально-економічних аспектах та доступності житла. Було запропоновано три типи житлової забудови, що базувалися на стандартній типології будинків та враховували рекомендовані площі й стандарти Міністерства будівництва. Досвід відбудови міста Мосула свідчить, що залучення внутрішньо переміщених осіб до формування моделей майбутньої забудови є

важливою умовою відповідності житлових рішень реальним потребам населення [8, с. 3]. Під час розробки концепцій відновлення враховувалися типологія забудови, середній розмір ділянок, оптимальна площа приміщень та житлові стандарти. Окрім того, у проєктах передбачалися ключові вимоги до житла, зручне планування, способи пересування мешканців та необхідний рівень приватності. Такий підхід забезпечує відповідність житлових рішень реальним потребам населення та сприяє ефективному відновленню міст.

Воєнні події в Сирії також призвели до масштабних руйнувань, особливо на околицях Дамаска. Унаслідок переміщення населення та дефіциту доступного житла домінувати почали неформальні житлові поселення, які стали фактичним вирішенням житлової кризи під час війни. Нове формальне житлове будівництво, орієнтоване на інвесторів, виявилось недоступним для широких верств населення. Таким чином, неформальне житло є найпоширенішим розв'язанням житлової кризи воєнного [9, с. 13].

Аналіз досвіду трьох азійських країн, що пережили шість масштабних катастроф, показує, що ефективна відбудова повинна поєднувати соціальний компонент, технічний підхід «будівництва на місці» та врахування локальних будівельних практик і часових обмежень [10, с. 1]. При цьому не лише війни, а й природні катастрофи формують значний обсяг пошкодженого житла. Наприклад, у Таїланді постраждалим було запропоновано державні програми відновлення та переселення з іпотечною підтримкою [10, с. 4], а в індійському Гуджараті реконструкція включала соціальний супровід, технічну підготовку спеціалістів та забезпечення матеріалами [10, с. 6]. В Японії практики відновлення традиційно спираються на масштабне державне житлове будівництво.

Серед інноваційних підходів привертає увагу методологія модернізації, що передбачає використання збірних дерев'яних панелей і сталевих ферм з підвищеною енергоефективністю та швидким монтажем, дозволяючи одночасно оптимізувати виробництво та зберегти архітектурну цілісність середовища [11, с. 4].

Досвід Боснії та Герцеговини демонструє, що відновити пошкодження, спричинені війною, миттєво неможливо, навіть за умов реалізації «швидких» заходів. Відсутність цілісної стратегії уповільнює процес відбудови та збільшує екологічні ризики. Особливе

занепокоєння викликає недостатній захист історико-культурної спадщини, яка часто зазнає непоправних втрат [12, с. 266].

Одним із перспективних напрямів відновлення є адаптивне використання наявних нежитлових будівель під житло. Це дозволяє зменшити потребу в новому будівництві, скоротити витрати на демонтаж і зменшити обсяг будівельних відходів. Дослідження підтверджують, що близько 40% загального впливу будівель на довкілля припадає на стадію виробництва матеріалів [13, с. 14], що робить модернізацію існуючих споруд більш екологічно виправданою, ніж їх повне знесення.

У разі демонтажу важливо враховувати не лише вплив нового будівництва, а й екологічні наслідки утилізації матеріалів наприкінці їх життєвого циклу. Зважаючи на те, що до 50% цього впливу пов'язано з несучими бетонними та сталевими конструкціями, доцільним є їх збереження з модернізацією огорожувальних елементів, за умови відсутності критичних пошкоджень.

В умовах повоєнної відбудови ключовим пріоритетом стає підвищення енергоефективності. Згідно з думкою експертів [14, с. 9–10], енергоефективна реконструкція нежитлових будівель не тільки дозволяє значно зекономити на будівельних матеріалах, а й розв'язує проблему дефіциту житла, знижуючи потребу в новому будівництві. Такі заходи є особливо актуальними в умовах, коли відновлення потребує великих ресурсів і оптимального використання наявних будівель.

Модернізація будівель через утеплення зовнішніх стін, заміну вікон на енергоефективні моделі [15, с. 14–16] та підвищення ефективності системи теплопостачання [15, с. 86–90] є одними з найбільш ефективних заходів для зниження енергетичних витрат. Крім того, впровадження інтелектуальних систем управління енергоспоживанням автоматизує контроль температури, освітлення і вентиляції, що дозволяє оптимізувати енергоспоживання і знизити витрати на утримання будівель [15, с. 94]. Також для енергоефективної реконструкції важливо інтегрувати відновлювальні джерела енергії, такі як сонячні панелі, вітрові турбіни або теплові насосні системи, які значно зменшують залежність від традиційних енергетичних ресурсів і забезпечують енергонезалежність будівель. Застосування таких технологій дозволяє не тільки знижувати експлуатаційні витрати, а й мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище.

Глобальний досвід свідчить, що універсальної моделі відбудови не існує. Умови, в яких опинилися українські міста, потребують індивідуальних рішень, що враховують масштаби руйнувань, соціальні потреби населення та енергетичні виклики. Завданням є не лише відновлення інфраструктури, а й формування стійких, енергоефективних та адаптивних до майбутніх загроз урбаністичних систем.

Відбудова має стати можливістю для впровадження інтелектуальних систем управління, використання екологічних матеріалів, розвитку циркулярної економіки та підготовки фахівців, здатних реалізовувати інноваційні проекти. Це дозволить не просто відновити міське середовище, а й трансформувати його на засадах сталого розвитку.

В умовах фінансових обмежень модернізація наявних будівель стає раціональнішим варіантом порівняно з новим будівництвом. Для нежитлової забудови це особливо важливо, оскільки такі об'єкти часто характеризуються високим енергоспоживанням, яке може бути суттєво знижене завдяки впровадженню сучасних технологій з використанням відновлювальних джерел енергії. Комплексна модернізація підвищує енергоефективність, зменшує експлуатаційні витрати та покращує якість внутрішнього мікроклімату, забезпечуючи комфорт користувачів.

Таким чином, узагальнення міжнародного досвіду та аналіз можливостей українського контексту формують підґрунтя для переходу до розгляду конкретних підходів і технологічних рішень, які можуть бути застосовані під час реконструкції інженерних об'єктів нежитлового фонду в Україні.

3. Реконструкція інженерних об'єктів нежитлового фонду в процесі відбудови України

Об'єктом дослідження виступає нежитлова забудова, частково зруйнована під час воєнних дій на півдні України, яка потребує комплексної реконструкції та адаптації до сучасних умов експлуатації з урахуванням вимог енергоефективності. Предмет дослідження зосереджено на формуванні громадського простору через модернізацію зруйнованих і застарілих об'єктів, із використанням інноваційних технологій, спрямованих на зниження енергоспоживання та забезпечення сталого розвитку.

Опис об'єкта реконструкції. Досліджувана будівля є двоповерховою спорудою прямокутної форми в плані. Покрівля будівлі є не експлуатованою рубероїдною, однак над нею була встановлена конструкція з сонячними панелями, що дозволяє забезпечити часткову енергетичну автономність будівлі. Розміри будівлі в осях складають 14000×7000 мм, що забезпечує достатній простір для майбутнього перетворення об'єкта на ефективний громадський простір з підвищеними енергетичними характеристиками.

Реконструкція цієї будівлі передбачає застосування комплексних енергоефективних рішень, таких як утеплення зовнішніх стін, заміну вікон на енергоефективні конструкції та оновлення системи опалення та вентиляції. Окрім того, передбачається подальше використання сонячних панелей на даху для генерації електричної енергії, що дозволить зменшити енергетичні витрати будівлі та сприяти зниженню її вуглецевого сліду.

Реалізація таких рішень сприятиме не лише відновленню функціональності будівлі, а й формуванню енергоефективної інфраструктури, що відповідає завданням відбудови України після закінчення війни. Застосування комплексних інноваційних підходів дозволяє створити стійкі та комфортні громадські простори, які відповідають сучасним екологічним стандартам.

Для дослідження загальних концепцій реконструкції нежитлових та зруйнованих будівель у контексті енергоефективної відбудови було застосовано комплексний підхід, що включав кілька ключових етапів. Першим кроком став статистичний аналіз інформаційних джерел, що стосуються реконструкції та відновлення зруйнованих будівель, з акцентом на ефективність застосування енергоощадних технологій в процесі відновлення інфраструктури.

Натурні обстеження об'єктів та фотофіксація конструктивних елементів будівельного об'єкта нежитлового фонду дозволили детально зафіксувати стан будівлі, оцінити рівень зносу та визначити можливості для використання альтернативних та відновлювальних джерел енергії в процесі реконструкції. Цей етап став основою для подальшого графічного моделювання елементів забудови, що включає проєкт експериментальної реконструкції з акцентом на оптимізацію енергетичних показників об'єкта.

Особливу увагу було приділено розробці інженерних систем опалення, зокрема використанню енергоощадних та альтернативних джерел енергії, таких як сонячні колектори, теплові насоси та системи геотермального опалення. Ці технології дозволяють значно знизити енергетичні витрати будівель, покращити екологічні характеристики та зробити будівлю енергоефективною. Враховуючи екологічні та економічні виклики, розроблені також рекомендації щодо застосування енергоощадних технологій, які можуть бути інтегровані на різних етапах реконструкції. Розроблені рекомендації охоплюють також аспекти застосування новітніх технологій утеплення, вентиляції та інші методи підвищення енергоефективності будівель, що є важливими для зниження експлуатаційних витрат і сприяють стійкому розвитку енергетично ефективних міських та інфраструктурних систем.

Архітектурно-містобудівна практика в Україні за останні шість десятиліть демонструє поступову трансформацію від масового стандартизованого будівництва до реалізації проєктів, орієнтованих на принципи сталого розвитку та енергетичної ефективності. На рис. 1 подано матрицю, укладену на основі аналізу відкритих джерел [16, 17, с. 147–148, 18, с. 95–104] та фотоархівів [19; 20].

В матриці систематизовано еволюцію пріоритетів містобудівної політики, що проявляється у впровадженні інноваційних матеріалів, інтеграції інтелектуальних систем керування та модернізації житлової забудови. Ця матриця дозволяє наочно оцінити зміни в архітектурно-містобудівному підході, а також зрозуміти, як впровадження енергоефективних рішень вплинуло на містобудівні стратегії, покращуючи не тільки комфорт і економічність будівель, але й загальний екологічний баланс в урбанізованих районах.

Аналіз результатів впровадження заходів з модернізації будівель, зокрема в контексті енергоефективної відбудови, показав значні економічні вигоди для односімейних будинків. Завдяки використанню енергоощадних технологій, таких як утеплення фасадів, заміна вікон на енергоефективні та оптимізація систем опалення, вдається знижувати витрати на енергоспоживання, що робить такі будівлі більш сталими та економічно вигідними в довгостроковій перспективі. Однак варто зазначити, що витрати на реалізацію цих заходів для одного мешканця в односімейних будинках виявилися значно вищими,

	Односімейні будинки	Багатоқвар тирні будинки до 2 поверхів	Багатоқвар тирні будинки до 5 поверхів	Багатоқвар тирні будинки до 9 поверхів	Багатоповерхові будинки
1955-1975					
1978-1998					
2000-2022					

Рис. 1. Типологічна матриця житлових будівель в Україні

ніж для багатоквартирних будівель або багатоповерхівок. В середньому, витрати на модернізацію в цій категорії будівель можуть бути втричі вищими, що ускладнює їх фінансування для пересічних громадян.

Враховуючи обмежені можливості громадян України щодо фінансування таких заходів, державні субсидії та програми підтримки стають ключовими для забезпечення доступності та ефективності енергоефективної реконструкції. Важливою є роль держави у створенні умов для фінансування модернізації житлових об'єктів, зокрема для односімейних будинків, оскільки без такої підтримки досягнення значного прогресу в енергоефективності на рівні індивідуальних будівель може бути ускладнене. Відповідно, розробка державних програм субсидій, пільгових кредитів та стимулювання приватних інвестицій є важливими компонентами стратегії відновлення та розвитку енергоощадження в Україні. Авторська концепція реконструкції будівлі сформована на основі аналізу її поточного технічного стану та особливостей прилеглої території. Вихідними даними слугували фотографії реальної споруди, розташованої в Запорізькій області. Запропоновані проєктні рішення наведено на рисунку 2.

Будівля зберегла цокольний поверх із річкового каменю товщиною 400 мм, що виконуватиме функцію рекреаційної зони. Перекриття виконано з пустотних плит серії 1.141.1, перегородки – зі стінової цегли товщиною 120 мм. Зовнішні стіни першого поверху з перлітобетону утеплені пінополістиролом і захищені декоративно-оздоблювальними шарами.

Другий поверх було демонтовано до реконструкції для мінімізації витрат та оптимізації проєктних рішень. У проєкті реконструкції будівлі було розглянуто кілька варіантів інженерних систем опалення, кожен з яких має на меті покращення енергоефективності та зниження енергоспоживання будівлі. Ось детальний аналіз запропонованих варіантів:

Варіант А: Тепла підлога з водяним підігрівом та тепловий насос (повітря-вода). Цей варіант передбачає використання теплового насоса, що забирає тепло з навколишнього повітря та передає його для опалення будівлі через систему теплої підлоги. Тепловий насос має високу енергоефективність, оскільки він здатен генерувати більше

тепла, ніж споживає електричної енергії. Це рішення дозволяє значно зменшити витрати на енергопостачання та є ідеальним для відновлення будівель у повоєнний період.



Рис. 2. Стадії реконструкції будівлі

Джерело: дослідження автора

Варіант Б: Тепла підлога з водяним підігрівом та електричний котел. В цьому варіанті використовується електричний котел для нагріву води в системі теплої підлоги. Хоча електричні котли менш енергоефективні порівняно з тепловими насосами, вони мають низькі вимоги до технічного обслуговування і є простими у встановленні. Цей варіант є вигідним, якщо в будівлі вже є доступ до електричної мережі, а також для менш енергомістких будівель.

Варіант В: Тепла підлога з водяним підігрівом та котел на твердому паливі. Використання котла на твердому паливі (наприклад, пелети або дрова) для опалення теплої підлоги дозволяє знизити залежність від електричних та газових мереж, що може бути особливо важливо в умовах енергетичної кризи або дефіциту енергоресурсів. Це також сприяє використанню відновлюваних джерел енергії та є економічно вигідним варіантом для регіонів з доступом до природних ресурсів.

Варіант Г: Сонячна електрична станція та підлога з електричним обігрівом. Встановлення сонячної електричної станції в поєднанні з електричним обігрівом підлоги дозволяє максимізувати використання відновлювальних джерел енергії. Сонячні панелі генерують електричну енергію для живлення системи опалення та інших потреб будівлі, знижуючи залежність від традиційних джерел енергії. Цей варіант є найбільш енергоефективним у довгостроковій перспективі та має значний екологічний ефект, сприяючи зменшенню викидів вуглекислого газу.

Кожен з цих варіантів має свої переваги та обмеження, і вибір оптимальної системи залежить від конкретних умов реконструкції будівлі, доступності ресурсів і довгострокових цілей енергоефективності. Усі ці рішення сприяють зниженню енергоспоживання будівлі, зменшенню витрат на утримання та підвищенню комфорту для мешканців, що є важливими аспектами в умовах енергетичної відбудови та сталого розвитку.

Для визначення оптимального варіанту інженерної системи опалення будівлі у контексті енергоефективної відбудови було застосовано комплексний підхід до оцінювання, який враховував ключові техніко-економічні показники. Основними критеріями вибору стали:

Енергетичні витрати: аналіз обсягів споживання енергії для кожного варіанта системи опалення з урахуванням сезонних коливань та

ефективності перетворення енергії. Особливу увагу приділено системам з використанням відновлюваних джерел енергії, таких як теплові насоси та сонячні електростанції, що сприяють зниженню експлуатаційних витрат.

Вартість обладнання: порівняння початкових інвестицій, необхідних для закупівлі та монтажу систем опалення, а також витрат на модернізацію існуючих інженерних мереж. Оцінено економічну доцільність використання інноваційних енергоощадних технологій, зокрема систем теплої підлоги та котлів на альтернативному паливі.

Вартість енергетичних витрат: проведено розрахунки вартості експлуатації кожного розглянутого варіанта системи опалення на основі прогнозованих тарифів на електроенергію, газ та тверде паливо. Особлива увага приділена окупності інвестицій у системи з відновлюваними джерелами енергії та потенційним можливостям отримання державних субсидій чи грантів на впровадження енергоефективних рішень.

Для порівняння енергоефективності різних варіантів інженерних систем опалення було проведено аналіз основних експлуатаційних та економічних показників, зокрема: річних енергетичних витрат (кВт·год), їхньої вартості у грошовому еквіваленті, потреби у твердому паливі (за наявності), а також орієнтовної вартості встановлення обладнання. Узагальнені результати розрахунків для чотирьох розглянутих систем опалення подано в таблиці 1.

Серед проаналізованих варіантів інженерних систем опалення були виявлені суттєві відмінності за вартістю обладнання та енергоефективністю в умовах експлуатації.

Варіант Г (сонячна електростанція та електрична тепла підлога) виявився найбільш витратним з погляду початкових інвестицій в обладнання.

Попри переваги використання відновлюваних джерел енергії, ефективність роботи сонячної станції в холодний період року є значно обмеженою. Зокрема, у зимові місяці продуктивність станції знижується до 5–10% від номінальної потужності, що не дозволяє забезпечити необхідний рівень теплопостачання без додаткових джерел енергії. Таким чином, цей варіант потребує резервного опалення або комбінованої системи для стабільного функціонування.

Варіант Б (тепла підлога з водяним підігрівом та електричний котел) характеризується високими експлуатаційними витратами через значне споживання електроенергії. Аналіз показав, що енергетичні витрати для цього варіанту вчетверо перевищують витрати, необхідні для реалізації варіанту А (тепла підлога з водяним підігрівом та тепловий насос типу «повітря-вода»), що робить його менш ефективним з погляду економії енергоресурсів.

Таблиця 1

**Порівняльні показники енергоефективності
інженерних систем опалення будівлі**

Показник	А. Тепла підлога з водяним підігрівом та тепловий насос	Б. Тепла підлога з водяним підігрівом та електричний котел	В. Тепла підлога з водяним підігрівом та котел на твердому паливі	Г. Сонячна електрична станція та підлога з електричним обігрівом
Енергетичні витрати кВт	12500	55555	1752	53217
грн	54000	240000	7568,6	229897,4
Тверде паливо т	-	-	9	-
грн	-	-	72000	-
Вартість обладнання, грн	822278	576778	642278	1894000

Аналіз варіантів систем опалення будівлі у контексті енергоефективної відбудови засвідчив відмінності в енерговитратах та окупності обладнання. Найнижче споживання електроенергії встановлено для варіанту В (котел на твердому паливі з водяним підігрівом). Однак, враховуючи високу вартість паливного матеріалу, загальні витрати на енергоносії за цим варіантом у 1,5 раза перевищують відповідний показник варіанту А (тепловий насос із системою теплої підлоги).

За результатами розрахунків енергоефективності, найменші сукупні витрати електроенергії визначено для варіанту А. Попри вищі початкові інвестиції у тепловий насос, вкладені кошти окупляться протягом 5,5 опалювальних сезонів, що робить цей варіант оптимальним у довгостроковій перспективі для енергоефективної відбудови.

Таким чином, проведений аналіз підкреслює важливість ретельного вибору системи опалення у контексті енергоефективної відбудови, особливо з урахуванням сезонних коливань продуктивності відновлюваних джерел енергії та вартості експлуатації систем, що працюють на електричній енергії. Найбільш перспективними для реалізації є комплексні або гібридні рішення, які поєднують енергоощадні технології та відновлювані джерела енергії.

У контексті енергоефективної реконструкції важливо враховувати не лише модернізацію окремих будівель, але й стан інженерних мереж, насамперед систем транспортування води, які є одним із найбільш енергомістких та вразливих елементів критичної інфраструктури.

4. Мережі транспортування води

як ключовий енергомісткий елемент критичної інфраструктури

Для дослідження впливу аварійних режимів на розподіл тиску у вузлах мережі, формування зон недостатніх та надмірних напорів, особлива увага приділялася оптимізації енерговитрат та ефективності роботи системи. Досягнення поставленої мети передбачало виконання наступних завдань:

- проведення гідравлічних розрахунків із моделюванням аварійних ситуацій на ключових ділянках мережі з акцентом на мінімізацію енергоспоживання;
- розрахунок п'єзометричних позначок та вузлових тисків при нормальних та аварійних режимах роботи для оцінки енергоефективності системи;
- визначення впливу окремих ділянок на формування та локалізацію зон тисків з метою оптимізації енергетичних ресурсів;
- оцінка наслідків аварійних ситуацій з точки зору впливу на загальний баланс енерговитрат та стабільність функціонування системи.

В межах дослідження енергоефективності систем критичної інфраструктури проведено комплексну оцінку ключових параметрів експлуатації мереж:

- визначення впливу окремих ділянок на гідравлічні характеристики мережі: проведено аналіз локалізації зон підвищеного та зниженого тиску, досліджено динаміку розподілу тисків в системі, що дозволяє ідентифікувати вузькі місця та потенційні втрати енергії;

– оцінка наслідків аварійних ситуацій на окремих ділянках: виконано моделювання варіантів відмов та проривів у системі, зокрема розраховано їхній вплив на розподіл тиску у вузлах мережі.

Окремо розглянуто заходи з мінімізації енергетичних втрат при виникненні аварійних ситуацій.

Дослідження проводились на основі проєктованих схем з урахуванням енергоефективності критичної інфраструктури. В табл. 1 наведені схеми розглянутих мереж, а також вказано ключові параметри роботи: загальна добова витрата $Q_{доб}$ ($m^3/доб$), номери вузлів підключення водоводів, а також номери елементів мережі, для яких моделювались аварійні режими роботи:

- мережа транспортування води А: 10 кілець, 18 вузлів та 27 ділянок;
- мережа транспортування води Б: 15 кілець, 25 вузлів та 39 ділянок;
- мережа транспортування води В: 9 кілець, 18 вузлів та 26 ділянок.

Для конфігурацій водопровідних мереж, схеми яких наведено в таблиці 1, були підготовлені вихідні дані, необхідні для виконання гідравлічного розрахунку мереж:

– визначення розрахункової витрати води, з урахуванням кількості жителів у відповідних районах міста та нормованої витрати води на одного жителя, що дозволяє оцінити загальну потребу в водопостачанні на основі демографічних даних та встановлених норм.

– складання розрахункової схеми водопровідної мережі на основі плану міста, де було пронумеровано всі ділянки мережі та вузли, що дає змогу коректно ввести необхідні дані для подальших розрахунків.

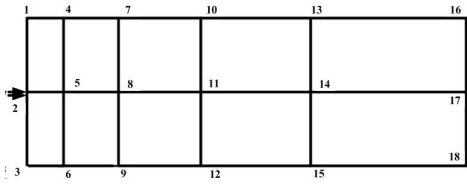
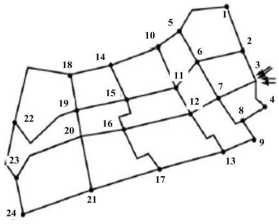
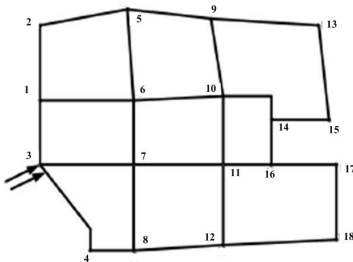
– визначення вузлових витрат води для кожного з вузлів мережі, що є критично важливим для коректного поточкорозподілу і забезпечення оптимальної роботи системи в різних умовах споживання.

– виконання початкового поточкорозподілу, що дозволяє отримати попереднє уявлення про динаміку руху води мережею, враховуючи всі характеристики трубопроводів, насосних станцій та інших елементів інфраструктури.

На основі цих етапів були сформовані вихідні дані для виконання гідравлічного розрахунку, які представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Характеристики схем водопровідних мереж

Конфігурація мережі	Схема мережі	Моделювання аварійних режимів
Схема А $Q_{\text{доб}} = 15000 \text{ м}^3/\text{доб}$		1) 1-2 і 1-4; 2) 4-7; 3) 7-10; 4) 10-13; 5) 13-16 та 16-17; 6) 2-5; 7) 6-8; 8) 8-11; 9) 11-14; 10) 14-17.
Схема Б $Q_{\text{доб}} = 7700 \text{ м}^3/\text{доб}$		1) 2-6; 2) 6-11; 3) 11-15; 4) 15-19; 5) 19-23; 6) 3-7; 7) 7-12; 8) 12-16; 9) 16-20; 10) 20-24.
Схема В $Q_{\text{доб}} = 96470 \text{ м}^3/\text{доб}$		1) 2-5; 2) 1-6; 3) 6-10; 4) 7-11; 5) 10-14; 6) 3-7; 7) 8-12; 8) 12-18; 9) 4-8; 10) 5-9.

Таким чином, дослідження проводилось на прикладі водопровідних мереж з продуктивністю $Q=7700\text{--}96470 \text{ м}^3/\text{доб}$, зокрема з акцентом на енергоефективність критичної інфраструктури. Для кожного варіанту аварійного режиму роботи мережі були виконані гідравлічні розрахунки, що дозволили оцінити вплив таких ситуацій на розподіл тиску у мережі та визначити площі районів з недостатнім напором води.

Особлива увага була приділена впливу аварійних режимів на енерговитрати мережі. Аналіз показав, як зміни в режимах роботи можуть

впливати на енергетичні витрати, що дозволяє виявити потенційні шляхи оптимізації для зниження споживання енергії та покращення стійкості системи.

Визначення цих впливів було здійснене на прикладі водопровідних мереж, схеми яких представлені в табл. 2. При моделюванні аварійних ситуацій були розглянуті варіанти, що максимально наближені до реальних умов експлуатації, з урахуванням можливих сценаріїв зниження тиску та ефективності використання енергії для забезпечення безперебійного водопостачання в умовах кризи.

Для кожної з розглянутих схем водопровідних мереж були виконані гідравлічні розрахунки з акцентом на енергоефективність та стійкість мережі до аварійних ситуацій. Визначені вільні напори у вузлах мережі були розраховані як для нормальних, так і для аварійних режимів роботи.

При нормальних умовах вільні напори у вузлах визначались відносно найбільш невідповідної точки мережі, що дозволяє оцінити ефективність використання енергоресурсів у стандартних режимах.

При моделюванні аварійних ситуацій, зокрема на окремих ділянках мережі, вільні напори визначались відносно вузла живлення, що дозволяє виявити потенційні ділянки з низьким тиском та підвищеними енергетичними витратами при відновленні нормального функціонування мережі.

Особливу увагу було приділено аналізу площ районів з недостатнім напором, які можуть виникати під час аварійних режимів роботи, для схем А та В. Це дозволило не тільки оцінити можливі зони зниженої ефективності водопостачання, але й оптимізувати енергетичні витрати для забезпечення надійності та стійкості водопровідної системи в умовах екстремальних ситуацій.

Для кожного з розглянутих варіантів аварійних режимів роботи було визначено розташування та розраховані площі районів з недостатнім напором. Межі цих районів були встановлені на основі розташування вузлів, в яких тиск не відповідав оптимальним значенням, необхідним для забезпечення ефективної роботи мережі:

$$H_{vi} < H_n, \quad (1)$$

де H_{vi} – значення вільного напору в i -му вузлі, м;

H_n – значення необхідного напору [21, п.6.3.1], м.

$$H_n = 10 + 4(n-1) \quad (2)$$

де n – кількість поверхів, в дослідженні розглянуто житлові райони з п'ятиповерховою забудовою, що дозволяє оцінити специфіку енергоспоживання та інфраструктурні потреби для багатоквартирних будинків середньої висоти та більш точно проаналізувати вплив висотності забудови на енергоефективність та функціонування відповідної мережі.

Зони формуються як результат проєкції віртуальної п'єзометричної поверхні на водопровідну мережу. Ця площа знаходиться на висоті $Z_i + H_n$ відносно рівня землі, де Z_i – висота на поверхні землі, а H_n – висота п'єзометричної поверхні, при умові (1). Зони визначаються за довжиною ділянок li , які відтинаються на магістральних мережах цією площиною та обслуговують будинки відповідно до умови (1). Це дозволяє точніше визначити вплив п'єзометричного напору на розподіл води в мережі та забезпечення енергоефективності водопостачання в цих зонах.

Як приклад результатів авторського дослідження, на рис. 3 наведено площинні графіки формування зон недостатнього напору у водопровідній мережі за схемою А, отримані в процесі моделювання аварійних режимів на окремих її ділянках. На рис. 3 зображено чотири аварійні ситуації, позначені фрагментами А–Г, що відображають різні варіанти порушень роботи мережі.

Розташування районів з недостатнім напором було визначено на основі умови збереження розрахункового напору у вузлі підключення водоводів до мережі, що дозволяє оцінити можливий вплив аварійних ситуацій на водопостачання в різних частинах мережі. Як видно з рис. 3.Б, при моделюванні аварійних ситуацій найбільшу площу зони недостатнього напору $F_{з.н.н.}$, відносно загальної площі $F_{заг.}$ ($F_{з.н.н.}/F_{заг.} = 85,1 \%$), слід очікувати при аварії на ділянці 2-5.

Ці результати дозволяють глибше зрозуміти, які ділянки мережі є найбільш уразливими в умовах аварійних ситуацій, а також підкреслюють важливість оптимізації системи для зменшення зон з недостатнім напором, що безпосередньо впливає на енергоефективність та стабільність водопостачання в таких районах.

Найменша площа зони з недостатнім напором ($F_{з.н.н.}/F_{заг.} = 6,6 \%$) утворюється під час аварії на ділянках 1-2 та 1-4 (рис. 3, А). Це явище

можна пояснити мінімальним навантаженням цих ділянок у загальному поточкорозподілі водопровідної мережі. Оскільки ці ділянки не несуть значного обсягу потоку води в нормальних умовах, їх пошкодження або відключення має менш виражений вплив на загальний розподіл тиску і напору в системі.

Такий результат знижує ступінь впливу аварійних ситуацій на енергоефективність водопостачання, оскільки для підтримки необхідного рівня напору в інших частинах мережі потрібно менше енергетичних витрат. Цей аспект важливий для забезпечення стабільності водопровідної мережі, оскільки дозволяє зберігати надійність постачання води при обмежених ресурсах і підвищує стійкість системи до аварій.

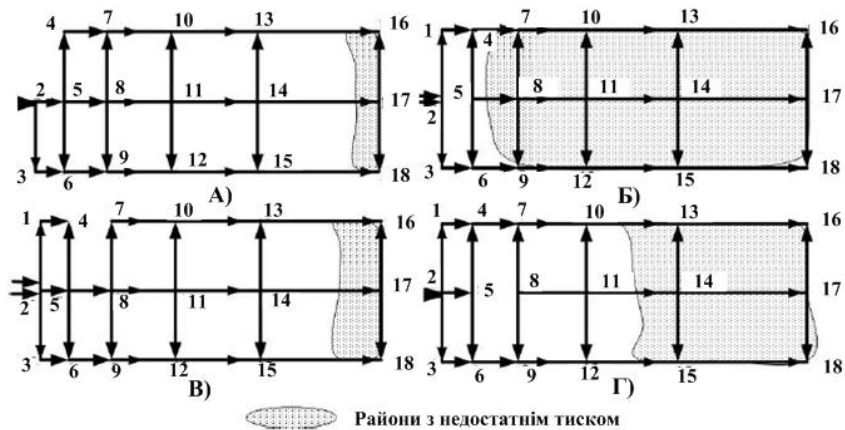


Рис. 3. Зони з низьким тиском у водопровідній мережі з урахуванням аварійних режимів експлуатації:
А – на ділянках 1-2 та 1-4; Б – на ділянці 2-5;
В – на ділянці 4-7; Г – на ділянці 5-8

Джерело: дослідження автора

Процес формування можливих районів з недостатнім напором під час моделювання аварійних ситуацій на прикладі водопровідної мережі, що представлена за схемою Б, продемонстровано у вигляді діаграми на рис. 4. Ця діаграма дозволяє наочно оцінити, як різні ава-

рійні режими впливають на розподіл напору в мережі, виявляючи зони з недостатнім тиском, що можуть виникати при порушеннях у роботі окремих ділянок. Таке моделювання є важливим для планування і забезпечення енергоефективного функціонування критичної інфраструктури, оскільки дозволяє передбачити та запобігти потенційним зниженням ефективності водопостачання в умовах аварій.

Слід зазначити, що найбільші площі зон з недостатнім напором спостерігаються при зміні пропускної здатності ділянок, розташованих на центральних магістральних лініях водопровідної мережі. Зокрема, при аварії № 6 на ділянці 3-7 (рис. 4, А) співвідношення площі зони недостатнього напору до загальної площі мережі становить $F_{з.н.н}/F_{заг} = 31,9 \%$, а при аварії № 3 на ділянці 11-15 – $F_{з.н.н}/F_{заг} = 25,6 \%$ (рис. 4, А).

Це пояснюється тим, що віддалені ділянки мають менший резерв пропускної здатності та під час аварій на цих ділянках вони змушені приймати основний потік, що значно збільшує навантаження на систему і призводить до зниження енергоефективності водопостачання.

Діаграма на рис. 4.Б показує збільшення необхідного напору ΔH у вузлі підключення водопроводів порівняно з розрахунковим напором для нормальних умов експлуатації, а також зменшення подачі води в мережу (схема В) під час аварійних ситуацій. Найбільші негативні наслідки, зокрема зниження подачі води до 11,7%, спостерігаються при аваріях на ділянках 3-7 та 8-12, що мають найбільше навантаження в загальному поточкорозподілі. Це свідчить про значний вплив цих ділянок на ефективність роботи водопровідної системи в умовах аварій.

Проте не всі ділянки магістральних ліній мають суттєвий вплив на зміни гідравлічних характеристик мережі. Наприклад, при аварії на ділянках 5-9 та 10-14 (схема В, табл. 2) загальна подача води знижується лише в межах 0,2-0,4 %, що вказує на мінімальний вплив цих ділянок на енергетичні витрати та стабільність водопостачання.

Ці результати підкреслюють важливість точного моделювання аварійних ситуацій для оптимізації роботи водопровідної мережі з урахуванням енергоефективності та забезпечення стабільного функціонування критичної інфраструктури навіть під час аварійних ситуацій на мережі.

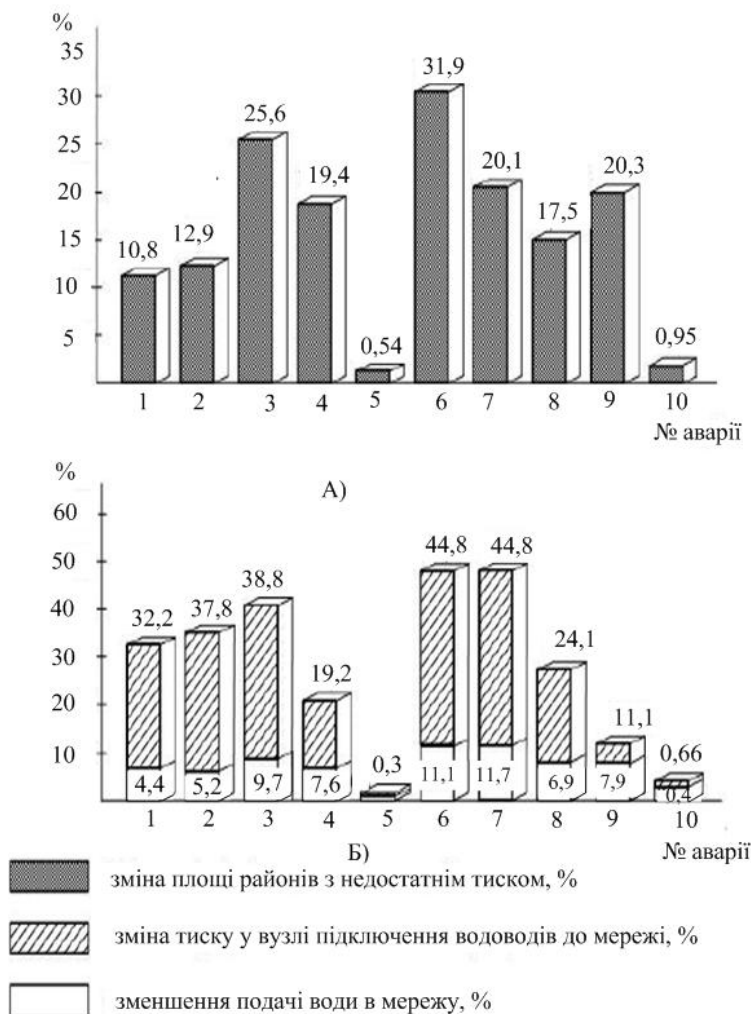


Рис. 4. Діаграми розподілу тиску та надходження води в мережу:
А – зміна площі зон з недостатнім тиском в мережі транспортування води; **Б** – збільшення необхідного тиску ΔH у вузлі приєднання водопроводів

Джерело: дослідження автора

Метод послідовного розрахунку аварійних режимів є ефективним інструментом для визначення пріоритетних ділянок водопровідної мережі, які потребують реконструкції та відновлення, з урахуванням їх впливу на енергоефективність та стабільність критичної інфраструктури. За допомогою цього методу можна оптимізувати енергетичні витрати мережі, знижуючи ризики порушення водопостачання в умовах аварій.

Аналіз розподілу потоків для проєктованих та наявних водопровідних мереж доцільно проводити за наступними етапами:

Оцінка гідравлічних характеристик мережі для визначення її здатності до ефективного розподілу потоків води під час нормальних та аварійних режимів. Це дозволяє ідентифікувати ділянки, які мають обмежену пропускну здатність і потребують модернізації для покращення енергоефективності.

Моделювання аварійних ситуацій на різних ділянках мережі з урахуванням реальних умов експлуатації. Це дозволяє виявити найбільш уразливі зони, де зниження напору може призвести до значного зростання енергетичних витрат, а також визначити можливість зменшення негативного впливу на водопостачання.

Оцінка впливу змін в поточкорозподілі на енергоефективність водопостачальної системи. На цьому етапі аналізується, як реконструкція окремих ділянок може знизити енергетичні витрати при забезпеченні стабільного тиску в мережі.

Пріоритетний вибір ділянок для реконструкції на основі отриманих результатів, з урахуванням їх важливості для підтримки енергоефективності критичної інфраструктури та здатності забезпечити надійне водопостачання в умовах можливих аварій.

Такий підхід дозволяє комплексно підійти до вдосконалення водопровідних мереж, оптимізуючи не лише їх конструкцію, а й енергетичні показники, що має вирішальне значення для забезпечення сталого функціонування критичної інфраструктури.

Таким чином, на основі аналізу прогнозованих або фактичних ситуацій, є можливість детально оцінити розподіл вузлових тисків, що дозволяє:

- провести аналіз витрат води на окремих ділянках мережі, а також оцінити вільні напори у вузлах: це дає змогу уточнити розташування

вузлів контролю тиску та обґрунтувати ефективний поточкорозподіл, що має критичне значення для забезпечення енергоефективності водопровідної системи;

– виконати розрахунок напору підживлювачів, зокрема з урахуванням необхідності підтримання оптимального тиску у ключових вузлах мережі для забезпечення належного рівня водопостачання.

Аналіз зон з недостатнім напором на етапі проєктування водопровідної мережі є важливим для обґрунтованого вибору місць розташування контрольних вузлів, що дозволяє оперативного коригувати тиск і потоки в разі аварій або порушень у роботі мережі. Цей підхід також сприяє оптимізації роботи системи, зокрема шляхом зменшення енергетичних витрат, що підвищує енергоефективність критичної інфраструктури.

Впровадження такого аналізу дозволить зменшити непродуктивні витрати питної води та значно знизити експлуатаційні витрати. Крім того, це покращить якісні показники централізованого водопостачання, зокрема стабільність тиску та надійність постачання води, що є важливим аспектом для забезпечення стійкої роботи критичної інфраструктури міста.

5. Висновки

В результаті проведеного дослідження було зроблено наступні висновки.

1. Теоретичні та методологічні основи дослідження довели, що ефективна післявоєнна відбудова України потребує системного підходу, який поєднує законодавчу підготовку, технологічну модернізацію та стратегічне планування. Визначення пріоритетів: від розмінування територій до відновлення житлового фонду й водопровідно-каналізаційних мереж дозволяє формувати послідовну та ресурсно обґрунтовану модель реконструкції.

2. Аналіз міжнародного досвіду відновлення інфраструктури після воєнних конфліктів показав, що найкращі стратегії ґрунтуються на комплексному підході, що включає соціальний, просторовий і техніко-економічний аспекти:

– реконструкція має враховувати локальні будівельні навички та залучення населення;

- відсутність системної стратегії призводить до затягування відбудови й збільшення екологічних ризиків;
- використання енергоефективних технологій скорочує витрати та посилює сталість відбудови.

Ці висновки є надзвичайно актуальними для України, що стикається зі схожими викликами.

3. Дослідження реконструкції інженерних об'єктів нежитлового фонду засвідчило, що модернізація зруйнованих будівель повинна базуватися на поєднанні енергоощадних технологій, структурної надійності та адаптивності простору. Проведене обстеження об'єкта, аналіз конструктивних елементів та запропоновані варіанти інженерних систем опалення довели, що:

- використання теплових насосів і сонячних систем є найбільш ефективним у довгостроковій перспективі;
- тепла модернізація (утеплення, заміна вікон, підвищення герметичності огорожувальних конструкцій) забезпечує суттєве зменшення енергоспоживання;
- вибір системи опалення має спиратися на техніко-економічний аналіз з урахуванням вартості встановлення, енерговитрат і терміну окупності.

Розрахунки підтвердили, що варіант із тепловим насосом (повітря–вода) є оптимальним для умов повоєнної відбудови.

4. Аналіз роботи мереж транспортування води показав:

- значні витрати енергії пов'язані з підтриманням стабільного тиску у мережі та компенсацією втрат у магістральних трубопроводах;
- аварійні режими суттєво змінюють гідравлічний баланс, створюють зони надлишкових і недостатніх тисків, що підвищує ризик гідравлічних ударів та нераціонального використання енергії;
- проведене моделювання довело необхідність упровадження енергоефективних заходів, таких як оптимізація діаметрів труб, автоматизоване регулювання насосних станцій та використання систем моніторингу вторат води.

Отримані результати можуть бути використані для подальшої роботи проєктів відбудови, удосконалення нормативної бази, формування техніко-економічних обґрунтувань реконструкції та планування розвитку інженерної інфраструктури у повоєнний період.

Список літератури:

1. ДБН В.2.2-15:2019. *Житлові будинки. Основні положення*. Київ : Мінрегіон України, 2019.
2. ДБН В.2.6-198:2014. *Сталеві конструкції. Норми проектування*. Київ : Мінрегіон України, 2014.
3. ДСТУ 9273:2024. *Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану*. Київ : Мінрегіон України, 2024.
4. Денісов М., Аверін Д. *Оцінка екологічної шкоди та пріоритети відновлення довкілля на сході України*. Київ : ВАІТЕ, 2017. 88 с. URL: https://www.osce.org/files/f/documents/6/3/362581_0.pdf (дата звернення 20.11.2025).
5. *Зруйнована інфраструктура водопостачання та водовідведення на Сході та Півдні України : аналітична записка*. URL: https://epl.org.ua/wp-content/uploads/2023/02/rujnuvannya-infrastruktury_vychytana-versiya.pdf (дата звернення 20.11.2025).
6. *Чим прислужиться Україні світовий досвід повоєнної відбудови*. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-vidbudova/3690887-cim-prisluzitsa-ukraini-svitovij-dosvid-povoennoi-vidbudovi.html> (дата звернення 20.11.2025).
7. Андрусевич А. *Повоєнна зелена відбудова України: процеси, зацікавлені сторони, участь громадськості : аналітичний звіт*. Київ : Суспільство і довкілля, 2024. 83 с. URL: https://ua.boell.org/sites/default/files/2024-05/racse-report_2024-5-13-1_ukr.pdf (дата звернення 20.11.2025).
8. Saeed Z., Almkhtar A., Abanda H., Tah J. *Mosul City: Housing Reconstruction after the ISIS War*. *Cities*, 2022, vol. 120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103460> (дата звернення 20.11.2025).
9. Wind B., Ibrahim B. *The war-time urban development of Damascus: how the geography and political economy of warfare affects housing patterns*. *Habitat International*, 2020, vol. 96, pp. 1–15. URL: https://pure.rug.nl/ws/portalfiles/portal/133410778/1_s2.0_S0197397519309464_main.pdf (дата звернення 20.11.2025).
10. Malyi E., Vakhnavati M., Sararit T. *People-centered disaster recovery: A comparison of long-term outcomes of housing reconstruction in Thailand, India, and Japan*. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, vol. 81. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212420922004538> (дата звернення 20.11.2025).
11. Fichera G., Guardo A., Margani G., Tardo C. *Application of a retrofit system to improve the seismic and energy performances of RC framed buildings*. *Procedia Structural Integrity*, 2024, vol. 55, pp. 193–200. URL: <https://tinyurl.com/5xahcytb> (дата звернення 20.11.2025).
12. Martinović A., Ifko S. *Industrial heritage as a catalyst for urban regeneration in post-conflict cities: Case study: Mostar, Bosnia and Herzegovina*. *Cities*, 2018, vol. 74, pp. 259–268. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264275117308338> (дата звернення 20.11.2025).
13. Lavagna M., Baldassarri C., Campioli A. *Benchmarks for environmental impact of housing in Europe: Definition of archetypes and LCA of the residential*

building stock. *Building and Environment*, vol. 145, pp. 260–275. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132318305560> (дата звернення 20.11.2025).

14. Oriol J., Vlada V., Fabbri M. *BPIE – Building Back Better: 6 investment criteria to drive a sustainable reconstruction of Ukraine's built environment. Buildings Performance Institute Europe*, 2024. 26 p. URL: <https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2024/02/FINAL-Reconstruction-of-Ukraine.pdf> (дата звернення 20.11.2025).

15. Mørck O.C., Rose J., Thomsen K.E., Matuška T., Vega S. *Overview of available and emerging technology for cost-effective building renovation at district level – Technology Overview Report. International Energy Agency*, 2023. 147 p. URL: https://annex75.iea-ebc.org/Data/publications/Annex75_A1_Report_TechnologyOverview_07_July_2023.pdf (дата звернення 20.11.2025).

16. MERP (Municipal Energy Reform Project). *Будівлі, зведені 1970–1980-х роках*. URL: https://merp.org.ua/articles/818-1970-1980.html#google_vignette (дата звернення: 25.11.2025).

17. Новосад І. Г. Інформаційні технології проєктування типових житлових будинків 1970–1980-х років. *Управління розвитком складних систем*. 2016. Вип. 26. С. 146–152. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/8044c3fe-76fe-4996-8869-6869baf9a595/content> (дата звернення: 25.11.2025).

18. Король В. П. Архітектурне проєктування житла: навч. посіб. Київ: Фенікс, 2006. 162 с.

19. Wikimedia Commons. *Ukrainian village house 01*. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ukrainian_village_house_01.jpg (дата звернення: 25.11.2025).

20. PastVu. *PastVu: архів історичних фотографій*. URL: <https://pastvu.com> (дата звернення: 25.11.2025).

21. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проєктування. Київ: Мінрегіон України, 2013. 140 с.

References:

1. ДБН В.2.2-15:2019. *Zhytlovi budynky. Osnovni polozhennia* [DBN V.2.2-15:2019. Residential buildings. Basic provisions]. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2019.

2. ДБН В.2.6-198:2014. *Stalevi konstruksii. Normy proektuvannia* [DBN V.2.6-198:2014. Steel structures. Design standards]. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2014.

3. DSTU 9273:2024. *Nastanova shchodo obstezhennia budivel i sporud dlia vyznachennia ta otsinky yikh tekhnichnoho stanu* [DSTU 9273:2024. Guidelines for inspecting buildings and structures to determine and assess their technical condition]. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2024.

4. Denisov M., Averin D. (2017). *Otsinka ekolohichnoi shkody ta priorytety vidnovlennia dovkillia na shkodi Ukrainy* [Assessment of environmental damage

and priorities for environmental restoration in eastern Ukraine]. Kyiv: VAITE, 88 p. Available at: https://www.osce.org/files/f/documents/6/3/362581_0.pdf (accessed November 20, 2025)

5. Zruianova infrastruktura vodopostachannia ta vodovidvedennia na Skhodi ta Pivdni Ukrainy: analitychna zapyska [Babanina I. Destroyed water supply and sanitation infrastructure in Eastern and Southern Ukraine: analytical brief]. Available at: https://epl.org.ua/wp-content/uploads/2023/02/rujnuvannya-infrastruktury_vychytana-versiya.pdf (accessed November 20, 2025)

6. Chym prysluzhytsia Ukraini svitovyi dosvid povoiennoi vidbudovy [How global post-war reconstruction experience can serve Ukraine]. Available at: <https://www.ukrinform.ua/rubric-vidbudova/3690887-cim-prisluzitsa-ukraini-svitovij-dosvid-povoennoi-vidbudovi.html> (accessed November 20, 2025)

7. Andrusyevych A. (2024). *Povoienna zelena vidbudova Ukrainy: protsesy, zaikavleni storony, uchast hromadskosti: analitychnyi zvit* [Post-war green recovery of Ukraine: processes, stakeholders, public participation: analytical report]. Kyiv: Suspilstvo i dovkillia, 83 p. Available at: https://ua.boell.org/sites/default/files/2024-05/racse-report_2024-5-13-1_ukr.pdf (accessed November 20, 2025).

8. Saeed Z., Almukhtar A., Abanda H., Tah J. (2022). *Mosul City: Housing Reconstruction after the ISIS War*. Cities, vol. 120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103460> (accessed November 20, 2025)

9. Wind B., Ibrahim B. (2020). *The war-time urban development of Damascus: How the geography and political economy of warfare affects housing patterns*. Habitat International, vol. 96, pp. 1–15. Available at: https://pure.rug.nl/ws/portalfiles/portal/133410778/1_s2.0_S0197397519309464_main.pdf (accessed November 20, 2025)

10. Malyi E., Vakhnavati M., Sararit T. (2022). *People-centered disaster recovery: A comparison of long-term outcomes of housing reconstruction in Thailand, India, and Japan*. International Journal of Disaster Risk Reduction, vol. 81. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212420922004538> (accessed November 20, 2025)

11. Fichera G., Guardo A., Margani G., Tardo C. (2024). *Application of a retrofit system to improve the seismic and energy performances of RC framed buildings*. Procedia Structural Integrity, vol. 55, pp. 193–200. Available at: <https://tinyurl.com/5xahcytb> (accessed November 20, 2025)

12. Martinović A., Ifko S. (2018). *Industrial heritage as a catalyst for urban regeneration in post-conflict cities: Case study: Mostar, Bosnia and Herzegovina*. Cities, vol. 74, pp. 259–268. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264275117308338> (accessed November 20, 2025)

13. Lavagna M., Baldassarri C., Campioli A. (2019). *Benchmarks for environmental impact of housing in Europe: Definition of archetypes and LCA of the residential building stock*. Building and Environment, vol. 145, pp. 260–275. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132318305560> (accessed November 20, 2025)

14. Oriol J., Vladyka V., Fabbri M. (2024). *BPIE – Building Back Better: 6 investment criteria to drive a sustainable reconstruction of Ukraine's built environment*. Buildings Performance Institute Europe, 26 p. Available at: <https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2024/02/FINAL-Reconstruction-of-Ukraine.pdf> (accessed November 20, 2025)
15. Mørck O.C., Rose J., Thomsen K.E., Matuška T., Vega S. (2023). *Overview of available and emerging technology for cost-effective building renovation at district level – Technology Overview Report*. International Energy Agency, 147 p. Available at: https://annex75.iea-ebc.org/Data/publications/Annex75_A1_Report_TechnologyOverview_07_July_2023.pdf (accessed November 20, 2025)
16. Wikimedia Commons. *Ukrainian village house 01*. Available at: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ukrainian_village_house_01.jpg (accessed November 25, 2025)
17. MERP – Municipal Energy Reform Project. *Buildings constructed in the 1970–1980s*. Retrieved November 25, 2025. Available at: https://merp.org.ua/articles/818-1970-1980.html#google_vignette (accessed November 25, 2025)
18. Novosad I. H. (2016). Informatsiini tekhnolohii proektuvannia typovykh zhytlovykh budynkiv 1970–1980-kh rokiv [Information technologies for designing standard residential buildings of the 1970–1980s]. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system* [Management of Complex Systems Development], 26, pp.146–152. Available at: <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/8044c3fe-76fe-4996-8869-6869baf9a595/content> (accessed November 25, 2025)
19. Korol V. P. (2006). *Arkhitekturne proektuvannia zhytla* [Architectural design of housing]. Kyiv: Feniks. 162 p. (in Ukrainian)
20. PastVu. *Archive of historical photographs*. Retrieved November 25, 2025. Available at: <https://pastvu.com> (accessed November 25, 2025)
21. DBN V.2.5-74:2013. (2013). *Vodospostachannia. Zovnishni merezhi ta sporudy* [Water supply. External networks and facilities]. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 140 p.