

ОПТИМІЗАЦІЯ БУДІВНИЦТВА В УМОВАХ КРИЗОВИХ СИТУАЦІЙ ТА ПОДАЛЬШОГО ВІДНОВЛЕННЯ: АДАПТИВНІ МОДЕЛІ ДЛЯ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Адаптація будівельних процесів до умов кризових ситуацій та подальшого відновлення є одним із ключових чинників забезпечення стійкості критичної інфраструктури та життєздатності міст у сучасних соціально-економічних і екологічних умовах. Оптимізація будівництва в таких умовах передбачає використання адаптивних моделей, які дозволяють інтегрувати оцінку ризиків, ресурсне планування, часові рамки та фінансові обмеження в єдину систему управління проектами. Висока невизначеність, характерна для кризових періодів – від економічних потрясінь і природних катастроф до техногенних аварій – вимагає гнучких методів прийняття рішень, що забезпечують оперативне реагування та мінімізацію негативних наслідків.

У межах оптимізації будівельних процесів для критичної інфраструктури значну роль відіграють інструменти цифрового моделювання, включаючи BIM, геоінформаційні системи та системи підтримки прийняття рішень, які дозволяють здійснювати прогнозування розвитку ситуації, оцінювати ризики та визначати критичні ресурси. Адаптивні моделі дозволяють комбінувати сценарне планування, імовірнісні оцінки ризиків та мультифакторну аналітику, забезпечуючи інтеграцію стратегічних, тактичних і оперативних рішень. Це особливо актуально при реалізації проектів у критичній інфраструктурі, де будь-яка затримка або помилка може мати масштабні соціально-економічні наслідки.

Важливою складовою оптимізації є координація між державними органами, приватними компаніями та організаціями громадянського суспільства, що забезпечує ефективне управління ресурсами та контроль за виконанням робіт у режимі реального часу. Крім того, адаптивні моделі дозволяють планувати відновлення після криз, визначаючи пріоритети реконструкції, оптимальні шляхи використання ресурсів та послідовність реалізації ключових об'єктів критичної інфраструктури.

В результаті застосування адаптивних підходів до оптимізації будівництва зростає точність прогнозів, скорочується час реагування

на надзвичайні події, підвищується ефективність використання матеріальних і фінансових ресурсів, а також забезпечується стійкий розвиток об'єктів критичної інфраструктури.

Ключові слова: адаптивні моделі, критична інфраструктура, будівництво, кризові ситуації, цифрове моделювання, організаційно-технологічні рішення, управління ризиками будівництва.

Актуальність. Оптимізація будівельних процесів у кризових умовах та подальше відновлення є надзвичайно актуальною темою в сучасній будівельній галузі. Зростаюча частота економічних потрясінь, природних катастроф, соціально-політичних криз і техногенних аварій створює високу невизначеність у реалізації будівельних проєктів, особливо тих, що стосуються критичної інфраструктури. Недостатня підготовка до таких умов може призводити до серйозних фінансових втрат, порушення строків будівництва, зниження якості виконаних робіт та зростання соціальних ризиків для населення. Сучасні підходи до управління будівельними проєктами потребують інтеграції цифрових технологій, аналітичних систем та інноваційних управлінських моделей. Використання адаптивних методів, які враховують ризики, ресурсні обмеження та змінність зовнішнього середовища, дозволяє забезпечити стійкість проєктів та ефективне управління матеріальними, фінансовими і людськими ресурсами. Застосування цифрового моделювання, BIM, систем підтримки прийняття рішень і аналітики великих даних сприяє підвищенню точності прогнозів, плануванню критичних ресурсів та оперативному реагуванню на надзвичайні ситуації.

Основною проблемою є висока невизначеність і складність управління будівельними проєктами критичної інфраструктури в умовах кризових ситуацій. Економічні коливання, природні катастрофи, аварійні ситуації та техногенні ризики значно ускладнюють планування ресурсів, контроль витрат і забезпечення строків реалізації проєктів. Виникає необхідність розробки адаптивних моделей, які дозволяють інтегрувати ризик-орієнтоване планування, цифрові інструменти та аналітичні методи для ефективного управління критично важливими об'єктами. Ускладнює ситуацію також взаємодія великої кількості зацікавлених сторін — державних органів, приватних компаній, громадських організацій та місцевих громад. Відсутність єдиних методологій та стандартів адаптації до кризових умов створює ризики для економічної ефективності, безпеки та довгострокової стійкості будівельних проєктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Сучасні дослідження у сфері кризового управління будівництвом зосереджені на моделюванні ризиків, використанні цифрових технологій та адаптивних стратегій планування. Ряд науковців вказують на ефективність BIM, ERP-систем і систем аналітики для прогнозування ресурсів та оцінки ризиків. Також

розглядаються методи сценарного планування та мультифакторної аналітики для забезпечення стійкості критичної інфраструктури.

Незважаючи на ці досягнення, залишається низка невирішених проблем: відсутність інтегрованих моделей, що поєднують стратегічне, тактичне та оперативне планування; недостатнє використання цифрових платформ для синхронізації дій усіх учасників; обмежена методологія оцінки ефективності адаптивних моделей у реальному часі. Не розроблено стандартизованих підходів до координації державних і приватних ресурсів під час криз та відновлення об'єктів. Ці прогалини обґрунтовують потребу у комплексному системному підході до оптимізації будівництва та відновлення критично важливої інфраструктури.

Метою дослідження є обґрунтування використання адаптивних моделей оптимізації будівництва об'єктів критичної інфраструктури в умовах кризових ситуацій та подальшого відновлення.

Виклад основного матеріалу. У процесі формування та вибору адаптивних моделей оптимізації будівництва об'єктів критичної інфраструктури в умовах кризових ситуацій та подальшого відновлення, першочергово доцільно орієнтуватися на можливість впровадження прогресивних методів спорудження, застосування високотехнологічного інженерного забезпечення та використання інноваційних підходів до організації всього процесу будівництва. На основі ми можемо обґрунтувати ряд адаптивних моделей проектного управління, яка відображає специфіку управлінських процесів в контексті будівництва критичної інфраструктури. 1. Організаційно-технологічна структура оптимізації будівництва передбачає створення узгодженої системи моделей, схем та алгоритмів, які розробляються в межах проекту організації будівництва. При цьому загальноплощадкові організаційно-технічні рішення поділяються на сукупність об'єктних підсистем, які деталізуються у технологічних картах та картах трудових процесів в складі проекту виконання робіт. Взаємозв'язок між організаційними та технологічними рішеннями забезпечується через стиковку загальноплощадкових та об'єктних структур, що в сукупності формують багаторівневу систему документації, в якій кожен вищий рівень є концептуально ширшим і слугує основою для розробки наступного рівня деталізації (рис. 1) [6].

Необхідна організаційно-технологічна система поділяється на дві взаємопов'язані компоненти: організаційну, що відповідає за систематизацію та впорядкування всіх елементів будівельного процесу з урахуванням просторово-часових та ресурсних обмежень, і технологічну, яка вміщує сукупність методів виконання будівельно-монтажних робіт, зокрема алгоритмізацію їх послідовності, способів реалізації та умов проведення.

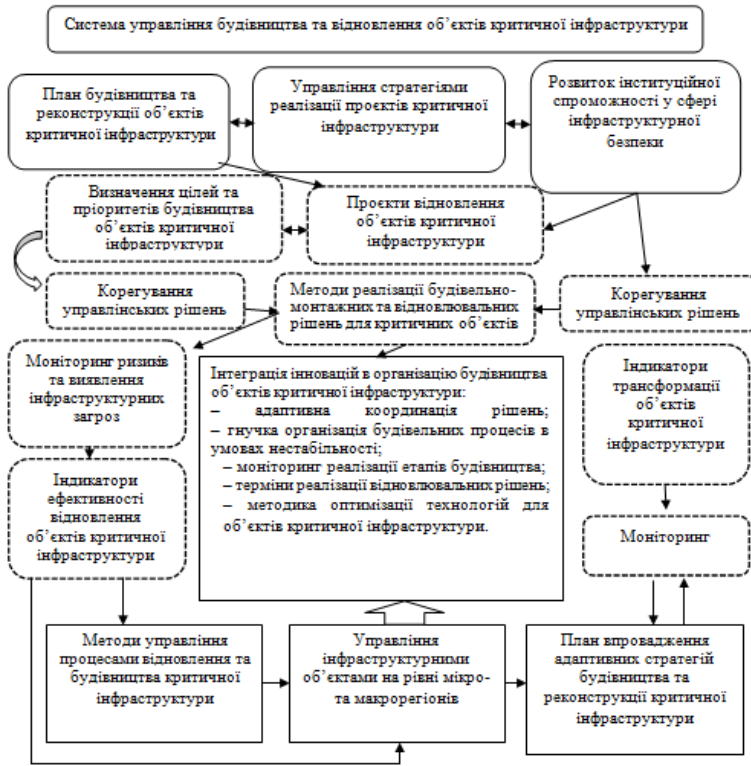


Рис. 1. Реалізація адаптивної організаційно-технологічної моделі оптимізації будівництва об'єктів критичної інфраструктури в умовах криз і відновлення (розроблено автором)

2. Адаптивна модель управління з елементами зворотного зв'язку. На управління процесами будівництва об'єктів критичної інфраструктури в умовах кризових викликів та наступного відновлення доцільно розглядати як адаптивну модель управління з елементами зворотного зв'язку, що забезпечує динамічне реагування на зміну умов реалізації (рис. 2). модель є складною інтегрованою системою, яка враховує багаторівневу взаємодію між суб'єктами управління, об'єктом реалізації, ресурсним забезпеченням та зовнішніми впливами.

Структурно адаптивна модель включає декілька ключових компонентів:

– Об'єкт управління – це безпосередньо виробничий процес, який охоплює комплекс робіт, що виконуються в обмеженому часовому проміжку з метою створення одного чи кількох конструктивних елементів об'єкта критичної інфраструктури (мости, захисні споруди,

енергетичні вузли тощо), ураховуючи вимоги швидкої мобілізації та стійкості до ризиків;



Рис. 2. Адаптивна модель управління будівництвом об'єктів критичної інфраструктури в умовах кризи та подальшого відновлення (розроблено автором)

– Управлінська система (УС) – багаторівнева структура прийняття рішень та координації діяльності всіх учасників будівельного процесу, яка забезпечує планування, моніторинг, адаптацію та коригування дій в режимі реального часу;

– Зовнішнє середовище – це сукупність зовнішніх факторів, які суттєво впливають на реалізацію проєкту: нормативні вимоги до якості робіт, системи фінансування та оплати, податкові режими, воєнно-політичні обмеження, логістичні виклики тощо [7];

– Прямий зв'язок – управлінські впливи (накази, розпорядження, нормативно-технічна документація), які надходять від УС до виконавчих структур з метою ініціювання або корекції процесів будівництва;

– Зворотний зв'язок – інформаційний потік, що повертається до керуючої системи і містить дані про ефективність виконання робіт, рівень використання ресурсів, наявність відхилень, ризиків або аварійних ситуацій, що дозволяє приймати оперативні управлінські рішення.

У межах адаптивного підходу управлінська система розділяється на два функціональні контури:

– УС-1 – контур стратегічного управління будівельною організацією як централізованим суб'єктом управління, відповідальним за загальну координацію, підготовку ресурсної бази, формування календарно-планових рішень, логістичну підтримку та стратегічне планування розміщення техніки та персоналу;

– УС-2 – контур оперативного управління безпосередньо на рівні об'єкта будівництва (на локації), що включає інженерно-технічний персонал (прораби, майстри, начальники дільниць), відповідальний за реалізацію технічних рішень, фіксацію параметрів виробничих процесів, обсягів виконаних робіт та фактичне використання матеріально-технічних ресурсів [8].

Інженерне визначення системи організації будівельного виробництва до початку виконання будівельно-монтажних робіт (БМР) може бути представлено з урахуванням системного підходу наступним чином:

$$\left\{ \frac{\{ \exists \text{ObjOrgSP} \subseteq \{ \{ \text{KP} \} \cup \{ \{ \text{SGP} \} \times \{ T_{\text{smr}} \} \};}{\exists \text{ObjOrgSP} / \text{Org} \{ \{ \text{Teh_proc} \}; \{ \text{Serv} \} \rightarrow \{ \text{Teh_proc} \} } \right\} \quad (1)$$

де: – ObjOrgSP – сукупність параметрів проектних рішень, що стосуються критичного інфраструктурного об'єкта;

– KP – набір параметрів календарного плану реалізації будівництва;

– SGP – множина параметрів генплану будівництва;

– T_{smr} – запроєктована тривалість виконання будівельно-монтажних робіт, дні;

– Org – оператор адаптивної організації, який формалізує порядок виконання технологічних процесів (Teh_proc) і забезпечення ресурсами (Serv);

– Teh_proc – сумарна тривалість реалізації комплексу техпроцесів, дні.

У даній структурі перша частина виразу (1) визначає, що результатом формування організаційної моделі будівництва до початку робіт є значення T_{smr} , що є функцією від параметрів календарного плану та будівельного генплану, які в сукупності описують загальну структуру й тривалість проектної реалізації критичного об'єкта. Друга частина виразу (1) підкреслює, що на основі параметрів організації виконання техпроцесів та заходів ресурсного забезпечення формується прогнозована множина параметрів виконання технологічних етапів, обумовлена як зовнішніми умовами реалізації (кризовими факторами), так і конкретними конструктивними відмітками, які характеризують фізичне положення об'єкта на стадії виконання [9]. Окреслена адаптивна модель формує динамічну організаційно-технологічну модель, що забезпечує ефективне управління будівництвом критичної інфраструктури в умовах нестабільності та високого ступеня ризику, а також закладає підґрунтя для цифровізації процесів планування, моніторингу та коригування у реальному часі.

3. Цифрові технології моделювання організаційно-технологічних процесів. В межах дослідження, присвяченого розробці адаптивних моделей оптимізації будівництва об'єктів критичної інфраструктури та подальшого відновлення в кризових умовах, особливу увагу заслуговує

застосування цифрових технологій моделювання організаційно-технологічних процесів. Одним з провідних інструментів у цьому контексті виступає цифрова модель організації будівництва (цифровий проєкт організації будівництва – ПОБ), яка являє собою комплексну інформаційну 3D-модель, що поєднує проєктні рішення, планування будівельних процесів, аналіз логістичних сценаріїв та візуалізацію виконання робіт у часовому вимірі (4D). Цифровий ПОБ моделює, яким чином обраний набір рішень щодо об'єкта критичної інфраструктури (ОКІ) буде реалізовуватись у рамках будівельного процесу. Всі його елементи тісно інтегровані з видами робіт та технологічними етапами, що дає змогу максимально точно координувати послідовність дій, ресурси й строки [10].

Прикладом практичного використання цифрового ПОБ може слугувати будівництво підземно-наземного об'єкта (тунелю), організованого за адаптивною схемою. Вже на ранньому етапі було виявлено критичний ризик – перетин майбутньої траси споруди з існуючими залізничними шляхами. Для побудови 4D-моделі були використані такі вихідні дані: двовимірні креслення об'єкта (2D), обсяги земляних робіт, графіки виконання робіт. На базі цієї інформації було створено тривимірну модель майбутнього об'єкта (тунелю), включаючи моделі нульового циклу: котловани, шпунтові огорожі, розпірки тощо. Крім того, було згенеровано три сценарії календарного плану реалізації: оптимістичний, песимістичний і найбільш імовірний [11]. Для пришвидшення побудови цифрових моделей були застосовані програмовані сценарії на платформі Dynamo, яка дозволяє гнучко адаптувати інформаційні моделі до специфіки об'єкта. Було створено окремі скрипти для:

- автоматичного моделювання розпірної системи в кількох будівельних зонах одночасно;
- відтворення послідовності земляних робіт;
- побудови 3D-траєкторії тунелю.

Після завершення усіх етапів 3D-моделювання було створено 4D-модель об'єкта, яка дозволила візуалізувати технологічні та організаційні процеси на кожній ділянці будівництва загальною протяжністю понад 1,5 км. Цифровий ПОБ також забезпечив розбиття траси на локальні захватки (будівельні ділянки), на кожну з яких було сформовано окремі графіки реалізації робіт. На рисунку 3а показано початкову фазу будівництва: паралельне виконання земляних робіт на кількох ділянках, монтаж шпунтових огорож з розпірками. Синім кольором позначено ділянку діючої залізниці, що перетинає проєктований маршрут [12]. Роботи ведуться лише на тих ділянках, які не перетинаються з існуючою інфраструктурою. На рисунку 3б ілюстровано завершення частини бетонних робіт і початок нового етапу монтажу шпунта і розпірок на суміжних ділянках.



Рис. 3. Стадії реалізації будівництва об'єкта критичної інфраструктури (підземно-наземний тунель): а) Початковий етап будівництва; б) Завершення монолітних робіт на окремих будівельних ділянках [8]

Для забезпечення безперервності робіт було вирішено реалізувати тимчасову об'їзну залізничну ділянку, що дозволило демонтувати стару колію на час основного будівництва (рис. 4а). Після цього було розпочато спорудження підземної частини об'єкта на ключовій ділянці (рис. 4б).

По завершенні усіх будівельних робіт залізнична ділянка (синій колір) була повністю відновлена в первинних межах, а тимчасова об'їзна гілка (позначена червоним) – демонтована. Усі наведені візуалізації були отримані за допомогою розробленого цифрового ПОБ, що підтверджує ефективність інтеграції цифрового моделювання у практику адаптивного управління будівництвом об'єктів критичної інфраструктури в умовах високої невизначеності та кризових обмежень [13].

4. Адаптивна 4D-модель управління реконструкцією енергетичного об'єкта критичної інфраструктури на основі інформаційного моделювання будівництва. У процесі реалізації робіт із комплексної реконструкції та технічного переоснащення теплоелектроцентралі (ТЕЦ), замовник зіткнувся з необхідністю визначення оптимального розміщення вантажопідіймальної техніки та будівельних механізмів, що були критично важливими для забезпечення ефективного демонтажу застарілого устаткування та монтажу нових енергетичних блоків. Стало очевидним, що використання лише традиційних 2D-проектів, а також класичних організаційно-технологічних документів (ПОБ і проекту

виконання робіт – ПВР), є недостатнім для врахування всіх ризиків, пов'язаних із проведенням складних будівельних і монтажних операцій на об'єкті критичної інфраструктури.



Рис. 4. Етапи адаптивного будівництва підземно-наземного об'єкта критичної інфраструктури: а) початок реалізації будівництва; б) завершення монолітних робіт на декількох ділянках [8]

У зв'язку з цим було прийнято рішення впровадити сучасний підхід – розробку 4D-ПВР (цифрового проєкту виконання робіт) для кожного енергетичного об'єкта в межах ТЕЦ. Одним із прикладів застосування такого підходу стала розробка 4D-моделі для окремого енергоблока, що дозволила усунути значну кількість проблем як на етапі проєктування, так і в процесі будівництва.

У якості вихідних даних були використані 3D-моделі енергоблока за розділами робочої документації (РД), організаційно-технологічна документація, а також календарні графіки виконання будівельних робіт. Під час комплексного аналізу було виявлено низку невідповідностей: розбіжності між РД та графіками, між РД і 3D-моделлями, дублювання процесів у календарному плануванні, відсутність взаємоузгодженості між графіком і моделлю (наприклад, наявність об'єктів у 3D-моделі без відповідних робіт у графіку і навпаки), помилки в моделюванні конструктивних елементів, а також хронологічні та технологічні колізії у послідовності виконання операцій. Подібні недоліки зазвичай стають явними саме на етапі створення 4D-моделі, що підкреслює її роль як інструменту аудиту, узгодження і адаптації вихідної інформації. Якість та швидкість створення 4D-моделі безпосередньо залежать від повноти і достовірності вхідних даних [14]. У процесі створення 4D-ПВР було

проведено серйозну роботу з підвищення якості та адаптації вихідної інформації, зокрема усунення критичних просторових конфліктів, очищення моделей від зайвих або дублюючих елементів, перекласифікація і доідентифікація об'єктів, перетворення відсутніх 2D-чертежів у відповідні 3D-елементи (за потреби – із залученням додаткових спеціалістів BIM-моделювання), оновлення та доопрацювання календарного графіка [15].

Так, наприклад, у початковій версії графіка монтаж трубопроводів планувався до встановлення металоконструкцій, на яких вони мали б бути змонтовані, що є технологічним порушенням (рис. 5).

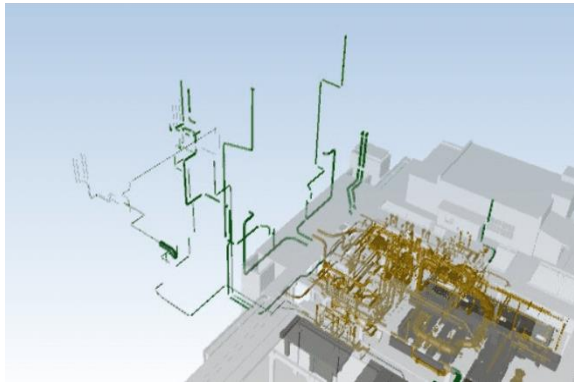


Рис. 5. Тимчасова колізія, виявлена під час розробки адаптивної 4D-моделі реконструкції енергетичного об'єкта критичної інфраструктури (розроблено автором)

Ще одна колізія стосувалась монтажу вертикальних стійок одразу після встановлення фундаментів, але до заливки плити перекриття (рис. 6), що не дозволяло б забезпечити стійкість елементів.

Окрім виявлення помилок, 4D-модель дає[16]:

1. Здійснювати моніторинг ходу виконання робіт у реальному часі, використовуючи хмарні сервіси;
2. Оптимізувати технічні рішення та черговість будівельно-монтажних процесів;
3. Контролювати відповідність між проєктними даними та фактичними результатами на будмайданчику.

Застосування технологій інформаційного моделювання у будівництві дає замовникам потужний інструмент прогнозування, контролю й адаптації, що особливо важливо в умовах кризових обмежень, динамічних змін зовнішнього середовища та високих вимог до енергетичної безпеки [17]. Отже, очікувана ефективність моделювання процесів будівництва значно підвищується за умови максимальної

відповідності моделі реальним умовам реалізації проєкту, що особливо актуально в умовах кризових подій. Саме тому сучасні підходи до побудови адаптивних моделей все частіше базуються на використанні цифрових технологій, алгоритмів автоматичного оновлення сценаріїв і параметрів, а також на системному впровадженні засобів штучного інтелекту для прогнозування можливих ризиків і підвищення точності управлінських рішень.

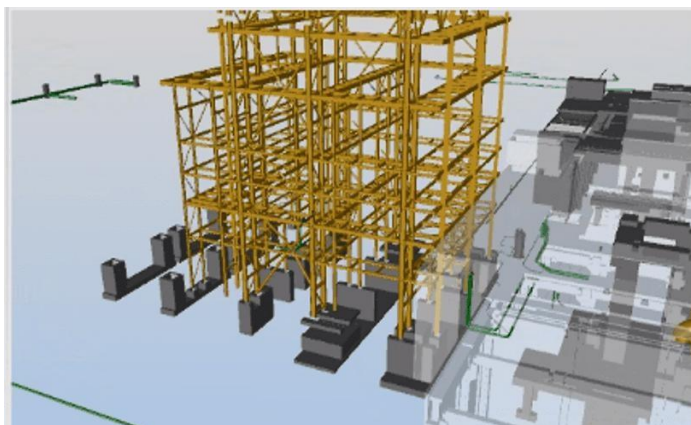


Рис. 6. Приклад порушення технологічної послідовності в адаптивній 4D-моделі будівництва енергетичного об'єкта критичної інфраструктури (розроблено автором)

Висновок. В ході дослідження вивчено основні аспекти взаємозв'язків між учасниками управління, інженерно-технологічними елементами будівельного процесу та факторами зовнішнього середовища. Це дало можливість розробити науково обґрунтовану концепцію багаторівневої адаптивної системи керування, здатної швидко реагувати на зміни у процесі реалізації будівельних проєктів. Було проведено аналіз поширених організаційно-технологічних схем, які застосовуються при зведенні критично важливих об'єктів, визначено їх слабкі сторони, особливо у надзвичайних ситуаціях. Особлива увага приділена необхідності узгодження загальноплощадкових та локальних технологічних рішень, а також створенню єдиної гнучкої моделі, яка забезпечує інтеграцію організаційних і технологічних процесів у режимі реального часу. Доведено ефективність застосування адаптивних моделей управління, оснащених механізмами зворотного зв'язку. Такі моделі дають змогу оперативно коригувати графіки та розподіл ресурсів, вчасно виявляти потенційні ризики та формувати стійке управлінське реагування в умовах серйозних загроз — військових, техногенних або логістичних.

Розроблено нову динамічну організаційно-технологічну модель будівництва, побудовану з використанням цифрових технологій, зокрема 4D-моделювання. Вона забезпечує комплексний аналіз проєктних і виконавчих даних, автоматичне виявлення логічних і технологічних протиріч, а також передбачення можливих просторових конфліктів. У ході практичної перевірки цієї моделі під час реалізації таких об'єктів, як будівництво тунелю та реконструкція енергетичного комплексу, запропоновано ряд інноваційних рішень щодо об'єднання цифрових платформ для досягнення повної координації між учасниками проєкту, оптимізації логістики, контролю виконання робіт та планування ресурсів.

References

1. Komyshev, D. H., & Beliatynskyi, A. O. (2023). Innovative technologies in construction: 3D printing of buildings, mobile applications, and artificial intelligence. *Bulletin of the National University of Water and Environmental Engineering. Series: Technical Sciences*, 4(104), 22–43. <https://doi.org/10.31713/vt420233>
2. Makedon, V., Karpenko, L., Petko, S., Bondarenko, S., & Ryzhova, V. (2024). Economic efficiency and environmental benefits of the development of renewable energy sources. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, 32(2), 239–257. URL <https://novapublishers.com/shop/economic-efficiency-and-environmental-benefits-of-the-development-of-renewable-energy-sources/>
3. Mahomedov, A. O. (2024). Reconstruction of critical infrastructure facilities in Ukraine after the war: Strategy and prospects. *Economics, Finance, Management: Topical Issues of Science and Practice*, 1(67), 99–115. <https://doi.org/10.37128/2411-4413-2024-1-7>
4. Fareniuk, H. H., Liubchenko, I. H., & Ruban, Yu. A. (2022). Inspections and emergency restoration works at facilities damaged by the armed aggression of the Russian Federation. *Science and Construction*, 33–34(3–4), 49–54. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-34-2022-5>
5. Barabash, M. S., & Bashynskyi, O. V. (2024). Some approaches to modeling the impact of blast waves on structures in LIRA-FEM. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 113, 241–249. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.241-249>
6. DBN V.1.2-7:2021. (2022). Basic requirements for buildings and structures. Fire safety. Kyiv: Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine. 17 p.
7. Rathnayaka, B., Siriwardana, C., Robert, D., Amaratunga, D., & Setunge, S. (2022). Improving the resilience of critical infrastructures: Evidence-based insights from a systematic literature review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 78, 103123. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103123>
8. Bielikov, A. S., Matsuk, Z. M., Korotaiev, V. M., & Tryhubenko, V. O. (2024). Ensuring security and adaptation of critical infrastructure considering the

principle of adequacy of probabilities. Ukrainian Journal of Construction and Architecture, 6, 42–47. <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.271224.42.1109>

9. DBN V.1.2-6:2021. (2022). Basic requirements for buildings and structures. Mechanical resistance and stability. Kyiv: Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine. 36 p.

10. Maksymenko, V. P., Murasova, O. V., & Kroshka, Yu. V. (2019). Assessing the impact of new construction on surrounding development using BIM and field observations. Construction Production, 65, 84–92.

11. Papimyk, R. B., Dikarev, K. B., Seletskyi, V. V., & Koval, V. V. (2024). Implementation of innovative technologies for construction and installation works under special conditions. Ukrainian Journal of Construction and Architecture, 5, 124–132. <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.301024.124.1101>

12. Sun, H. (2021). Machine learning applications for building structural design and performance assessment: State-of-the-art review. Journal of Building Engineering, 33, 101816. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101816>

13. Makedon, V., Myachin, V., Plakhotnik, O., Fisunen, N., & Mykhailenko, O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(13(128)), 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>

14. Esnoul, C., Colomo-Palacios, R., Jee, E., Chockalingam, S., Simensen, J. E., & Bae, D.-H. (2023). Report on the 3rd international workshop on engineering and cybersecurity of critical systems (EnCyCris-2022). ACM SIGSOFT, 48, 81–84. <https://doi.org/10.1145/3573074.3573095>

15. Skliarov, M. V., Shvets, V. V., & Kashkanov, A. A. (2024). Innovative technologies in construction as a resource for economic development and a factor in modernizing the construction economy. Modern Technologies, Materials and Structures in Construction, 2, 163–170. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-2-163-170>

16. Tatarchenko, H. O., Tatarchenko, Z. S., Panina, N. I., & Biloshytska, N. I. (2021). 3D modeling of construction projects. Modern Technologies and Methods of Calculation in Construction, 16(6), 194–204.

17. Yurchenko, Yu. V., Siora, O. V., Sokolovskiy, M. V., Bondarieva, V. I., & Bernatskyi, A. V. (2024). The use of laser technologies in construction. New Technologies in Construction, 44, 62–72. <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2024.44.9>

A.V. Blonnyi

Optimization of construction under crisis conditions and subsequent recovery: adaptive models for critical infrastructure

Adapting construction processes to conditions of crisis situations and subsequent recovery is one of the key factors in ensuring the resilience of critical infrastructure and the viability of cities under modern socio-economic and environmental conditions. Construction optimization in such scenarios

involves the use of adaptive models that allow for the integration of risk assessment, resource planning, timeframes, and financial constraints into a unified project management system. The high uncertainty characteristic of crisis periods—ranging from economic shocks and natural disasters to man-made accidents—requires flexible decision-making methods that ensure prompt response and minimize negative consequences.

Within the framework of optimizing construction processes for critical infrastructure, digital modeling tools play a significant role, including BIM, geographic information systems, and decision support systems, which allow forecasting of situations, risk evaluation, and identification of critical resources. Adaptive models enable the combination of scenario planning, probabilistic risk assessment, and multifactor analytics, ensuring the integration of strategic, tactical, and operational decisions. This is particularly relevant for projects within critical infrastructure, where any delay or error can have significant socio-economic impacts.

A crucial component of optimization is the coordination between government authorities, private companies, and civil society organizations, ensuring effective resource management and real-time control over project execution. Furthermore, adaptive models facilitate post-crisis recovery planning by defining reconstruction priorities, optimizing resource utilization, and sequencing the implementation of key critical infrastructure objects.

As a result of applying adaptive approaches to construction optimization, forecast accuracy increases, response times to emergencies are reduced, the efficiency of material and financial resource use is enhanced, and sustainable development of critical infrastructure objects is ensured.

Keywords: adaptive models, critical infrastructure, construction, crisis situations, digital modeling, organizational-technological solutions, construction risk management.

Посилання на статтю:

АРА: A.V. Blonnyi (2024). Optymizatsiya budivnytstva v umovakh kryzovykh sytuatsiy ta podal'sho vidnovlennya: adaptivni modeli dlya krytychnoy infrastruktury. [Optimization of construction under crisis conditions and subsequent recovery: adaptive models for critical infrastructure]. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 54(2), С. 200-213.

ДСТУ: Блонний А.В. Оптимізація будівництва в умовах кризових ситуацій та подальшого відновлення: адаптивні моделі для критичної інфраструктури. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2024. № 54 (2). С. 200-213.