

Сусанна ПАСТУХОВА,

старший викладач

ORCID: 0000-0002-9324-3065

Ірина АРУТЮНЯН,

д-р техн. наук, професор

ORCID: 0000-0002-5049-3742

Запорізький національний університет, м. Запоріжжя

ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКОВОГО УПРАВЛІННЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ УДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ТА СТАЛОГО РОЗВИТКУ В ЦИВІЛЬНОМУ БУДІВНИЦТВІ

У статті ґрунтовно розглянуто проблематику забезпечення проєктної енергоефективності цивільних будівель безпосередньо на етапі їх зведення шляхом удосконалення організаційно-технологічних рішень.

Детально проаналізовано традиційні підходи до управління будівельними потоками та виявлено ключові причини виникнення «розриву» між розрахунковим та фактичним енергоспоживанням, які криються у неконтрольованих технологічних відхиленнях, логістичних затримках та організаційних простоях.

Особливу увагу приділено розробці математичного інструментарію оптимізаційної моделі на основі методів системної динаміки та принципів потокового управління. Сформовано систему керування змінних та цільову функцію мінімізації інтегральних енерговитрат, що формалізує прямий взаємозв'язок між тривалістю робіт, непродуктивними втратами часу на майданчику та загальними енерговитратами будівництва і подальшої експлуатації.

Результати дослідження, перевірені за допомогою розрахункового експерименту, доводять перевагу індустріалізованого монтажу та потоково-паралельної організації робіт. Застосування оптимізованої моделі дозволило скоротити енерговитрати на стадії зведення з 420 до 310 МВт-год, зменшити загальну тривалість робіт з 14 до 11 місяців та суттєво підвищити інтегральний критерій ефективності організаційно-технологічних рішень (з 0,84 до 1,11).

У підсумку доведено, що динамічне моделювання потокового управління трансформує календарне планування з інструменту контролю термінів у науково обґрунтований механізм гарантування енергоефективності об'єкта, що є критично важливим для досягнення цілей сталого розвитку в сучасному цивільному будівництві.

Ключові слова: *організаційно-технологічні рішення, енергозберігаючі цивільні будівлі, динамічне моделювання, потокове управління, сталий розвиток, індустріалізований монтаж, системна динаміка, математична оптимізація, енергоефективність, ощадливе будівництво.*

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку цивільного будівництва

визначається масштабним переходом до принципів сталого розвитку, що відображається у необхідності жорсткого дотримання нормативних вимог щодо енергетичної ефективності об'єктів [1]. Енергозберігаючі будівлі відіграють ключову роль у досягненні глобальних кліматичних цілей, мінімізації енергоспоживання та підвищенні якості життя користувачів. Посилення екологічних стандартів, нормативно-правовий тиск та постійне зростання вартості енергоносіїв формують стратегічний напрям сталого розвитку, у якому будівлі з майже нульовим енергоспоживанням (nZEB) стають базовим галузевим стандартом. Проте імплементація таких високоточних проєктів в умовах реального будівельного виробництва супроводжується низкою організаційно-технологічних викликів, які суттєво знижують їхню ефективність.

Критичною проблемою сучасної будівельної галузі є наявність системного розриву між проєктними рішеннями щодо енергозбереження та реальними організаційно-технологічними механізмами їх реалізації на будівельному майданчику. Міжнародні дослідження доводять, що до 70% відхилень фактичної енергоефективності від проєктних значень закладаються саме на етапі зведення будівлі. Емпіричний аналіз вітчизняного досвіду реалізації енергозберігаючих об'єктів показує, що середнє відхилення фактичного енергоспоживання від проєктного може сягати +48–63%, незважаючи на використання інноваційних теплоізоляційних матеріалів та високотехнологічних інженерних систем. Цей феномен доводить, що наявність енергооптимізованого проєкту не гарантує енергоефективної будівлі за відсутності жорсткого організаційно-технологічного контролю. Розрив між проєктом і реальністю має не технічну, а переважно організаційну природу, оскільки виникає внаслідок фрагментованого управління технологічними процесами.

Традиційні методи планування будівельного виробництва, такі як лінійні графіки або мережеві моделі типу СРМ/PERT, виявляються недостатньо ефективними для вирішення цього завдання. Вони не здатні повною мірою врахувати динамічні взаємозв'язки між технологічними операціями, погодними умовами, зміною складу бригад та жорсткими вимогами до якості монтажу енергоефективних елементів. Будівництво розглядається як набір дискретних операцій, що призводить до порушення цілісності виробничих потоків, нерационального використання ресурсів та виникнення організаційних простоїв. Відповідно до концепції ошадливого будівництва (Lean Construction), такі явища класифікуються як «втрати» (waste), що підлягають усуненню для забезпечення безперервного потоку створення цінності.

У контексті зведення енергозберігаючих будівель організаційні «втрати» трансформуються у прямі втрати енергоефективності. Будь-які порушення організаційно-технологічної послідовності безпосередньо призводять до погіршення кінцевих теплотехнічних характеристик об'єкта.

Наприклад, часова затримка між етапами монтажу теплоізоляції та її подальшою герметизацією, а також низька якість облаштування пароізоляційного шару є домінуючими факторами, що здатні нівелювати закладений у проєкті енергозберігаючий ефект. Неконтрольовані теплові мости та порушення повітронепроникності огорожувальних конструкцій виникають саме в зонах організаційних розривів та недостатнього

технологічного контролю.

Для подолання цих бар'єрів необхідний перехід до безперервного потокового управління будівельними проєктами із застосуванням інструментів системної динаміки (System Dynamics). Цей підхід дозволяє вивчати системну структуру виробничих процесів, виявляти причинно-наслідкові зв'язки між елементами в їхній взаємодії та відстежувати накопичувальний ефект управлінських рішень у часі. Застосування математичного моделювання дозволяє формалізувати взаємодію технологічних операцій, матеріальних потоків та енергетичних параметрів у єдину систему змінних. Проте, незважаючи на значний прогрес у галузі цифрового моделювання та енергоаудиту, питання інтеграції методів системної динаміки безпосередньо для цілей оптимізації потоків енергоефективного будівництва залишається недостатньо розкритим.

Більшість існуючих організаційно-технологічних моделей орієнтовані виключно на мінімізацію термінів та вартості будівництва, залишаючи показники енергоефективності поза межами оптимізаційних алгоритмів. Водночас, забезпечення сталого розвитку в цивільному будівництві вимагає створення багатокритеріального математичного інструментарію, який би безпосередньо пов'язував технологічний графік з прогнозом експлуатаційної енергоефективності. Запровадження методів динамічного моделювання та потокового управління дозволить здійснювати процедурно-багатофакторну оптимізацію процесів, що забезпечуватиме не лише швидкість зведення, а й відповідність фактичних показників об'єкта вимогам nZEB.

Таким чином, об'єктивна необхідність зниження енергоспоживання будівельним [1] сектором та подолання технологічних розривів під час реалізації проєктів формують комплексну науково-прикладну проблему. Вона полягає у відсутності науково обґрунтованої методології удосконалення організаційно-технологічних рішень при зведенні та монтажі енергозберігаючих цивільних будівель на основі методів динамічного моделювання процедурно-багатофакторної оптимізації процесів (ДМПБФО) та потокового управління. Вирішення цієї проблеми має стратегічне значення для будівельної галузі, оскільки дозволяє гармонізувати економічну ефективність виробничих процесів з імперативами сталого розвитку та глобальної енергетичної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій Питанням підвищення енергоефективності будівель та впровадження принципів сталого розвитку в цивільному будівництві присвячено значну кількість праць вітчизняних та зарубіжних науковців. Державна політика у цій сфері регламентується відповідною нормативно-правовою базою, зокрема Законом України «Про енергетичну ефективність будівель» [1]. У попередніх дослідженнях [2] ґрунтовно розглядаються теоретико-прикладні аспекти удосконалення організаційно-технологічних рішень з позицій раціонального використання енергетичних ресурсів та створення математичних оптимізаційних моделей. Інтеграція інформаційного моделювання будівель з технологічними графіками будівництва для контролю якості та оптимізації процесів детально вивчається у працях У. Chen, Н. Luo [3] та інших дослідників.

Водночас у світовій практиці управління будівельними проєктами домінуючою тенденцією стає застосування концепції ощадливого будівництва

(Lean Construction) та методів картування потоку створення цінності (Value Stream Mapping – VSM), концептуальні засади яких закладені М. Rother та J. Shook [4]. Для аналізу таких складних багатофакторних виробничих систем дослідники успішно застосовують методи системної динаміки (System Dynamics). Зокрема, S. Cano та O. Rubiano [5] довели, що використання динамічних моделей дозволяє ефективно виявляти організаційні «втрати» (waste), прогнозувати наслідки управлінських рішень та усувати «вузькі місця» у потоках будівельного виробництва. Застосування системної динаміки для симуляції планування та контролю на будівельному майданчику також розглядалося у фундаментальних дослідженнях В. Mota, D. Viana та ін. [6].

Незважаючи на ґрунтовну теоретичну базу, питання інтеграції інструментів системної динаміки та потокового управління безпосередньо для цілей забезпечення енергоефективності на етапі зведення будівель залишається розкритим неповною мірою. Існуючі моделі управління потоками переважно орієнтовані на мінімізацію термінів та оптимізацію вартості робіт [5], тоді як вплив організаційних простоїв, порушення послідовності монтажу та логістичних затримок на кінцевий теплопір конструкцій (і подальші експлуатаційні енерговитрати) потребує додаткової математичної формалізації. Існує необхідність адаптації метрик ефективності та цілісності потоків [7] до завдань гарантування проєктного класу енергоефективності будівлі.

Актуальність і новизна. Актуальність дослідження зумовлена нагальною потребою подолання системного розриву між проєктними показниками енергоефективності цивільних будівель та їхніми фактичними експлуатаційними характеристиками, які суттєво знижуються через недоліки в організації будівельного виробництва на етапі зведення. Наукова новизна роботи полягає у розробці комплексного підходу до удосконалення організаційно-технологічних рішень, який вперше інтегрує методи динамічного моделювання (System Dynamics) та принципи потокового управління (Lean Construction) не просто для скорочення термінів чи вартості робіт, а як безпосередній математичний інструмент забезпечення проєктної енергоефективності. Запропонована модель процедурно-багатофакторної оптимізації процесів концептуалізує та математично формалізує прямий взаємозв'язок між непродуктивними простоями на будівельному майданчику та незворотними втратами теплотехнічних характеристик об'єкта, що формує нову наукову базу для реалізації цілей сталого розвитку в будівництві.

Метою статті є розробка комплексного підходу до удосконалення організаційно-технологічних рішень при зведенні та монтажі енергозберігаючих цивільних будівель на основі методів динамічного моделювання процедурно-багатофакторної оптимізації процесами потокового управління. Реалізація цієї мети передбачає формалізацію взаємозв'язку між технологічним графіком і енергетичними параметрами об'єкта з метою мінімізації непродуктивних втрат та забезпечення цілей сталого розвитку.

Методи дослідження. Для вирішення поставленого завдання у дослідженні застосовано комплексний методологічний підхід, що поєднує інструменти системної динаміки (System Dynamics) моделювання процедурно-багатофакторної оптимізації. Базовою гіпотезою виступає твердження, що енергоефективність будівлі визначається не лише проєктними рішеннями, але

й якістю та безперервністю технологічного процесу на будівельному майданчику.

Математичний інструментарій розробленої оптимізаційної моделі базується на формуванні сукупності керованих змінних:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}, \quad (1)$$

де x_1 – опір теплопередачі огорожувальних конструкцій; x_2 – рівень енергоефективності інженерних систем; x_3 – рівень індустріалізації монтажу; x_4 – тип організації будівельного процесу; x_5 – рівень використання цифрового моделювання; x_6 – тривалість будівельно-монтажних процесів.

Головною цільовою функцією розробленої моделі є мінімізація інтегральних енерговитрат протягом життєвого циклу об'єкта, що математично формалізується у вигляді:

$$Z = E_{\text{буд}}(x_3, x_4) + E_{\text{експ}}(x_1, x_2) \rightarrow \min \quad (2)$$

де $E_{\text{буд}}$ – енерговитрати на стадії зведення та монтажу;

$E_{\text{експ}}$ – прогностичні енерговитрати на стадії експлуатації.

У контексті потокового управління особливої ваги набуває параметр $E_{\text{буд}}$, який розглядається як керована величина, що оптимізується шляхом удосконалення організаційно-технологічних рішень (ОТР).

Загальна структура енерговитрат будівництва описується рівнянням:

$$E_{\text{буд}} = E_{\text{мех}} + E_{\text{тех}} + E_{\text{тимч}} + E_{\text{лог}} + E_{\text{втр}} \quad (3)$$

де $E_{\text{мех}}$ – витрати на роботу машин і механізмів; $E_{\text{тех}}$ – енерговитрати технологічних процесів; $E_{\text{тимч}}$ – витрати на функціонування тимчасової інфраструктури (зокрема, опалення незамкнучих контурів); $E_{\text{лог}}$ – енерговитрати на внутрішньомайданчикову логістику; $E_{\text{втр}}$ – непродуктивні енерговитрати.

Інтеграція принципів ощадливого будівництва (Lean Construction) у запропоновану математичну модель відбувається через мінімізацію непродуктивних енерговитрат ($E_{\text{втр}}$), які виникають внаслідок організаційних простоїв та порушення безперервності технологічних потоків. Ці втрати розраховуються на основі часу простоїв техніки та робітників ($t_{\text{пр},i}$), який безпосередньо залежить від планового часу простою ($t_{\text{пл}}$) та коефіцієнта синхронізації робіт ($k_{\text{син}}$). Застосування інструментів системної динаміки дозволяє відстежувати час виконання операції (t_i) як динамічну змінну, що акумулює технологічний час роботи, організаційні простої та логістичні затримки.

Для комплексної оцінки доцільності прийнятих організаційно-технологічних рішень, з урахуванням конфліктуючих цілей (мінімізації вартості C та часу T проти максимізації енергоефективності E), застосовується інтегральний критерій оцінки ефективності $K_{\text{ОТР}}$:

$$K_{\text{ОТР}} = \alpha \frac{E_{\text{норм}}}{E_{\text{факт}}} + \beta \frac{T_{\text{норм}}}{T_{\text{факт}}} + \gamma \frac{C_{\text{норм}}}{C_{\text{факт}}}, \quad (4)$$

де вагові коефіцієнти відображають стратегічний пріоритет енергозбереження ($\alpha \geq 0.5, \beta + \gamma \leq 0.5$) у межах парадигми сталого розвитку.

Такий методологічний апарат кардинально трансформує традиційну лінійну логіку організації будівництва на динамічну систему. Це створює наукову основу для алгоритмічного пошуку раціональних ОТР, наприклад, обґрунтування доцільності переходу до індустріалізованого монтажу та

потоково-паралельної організації робіт, що гарантують суттєве зменшення сукупних енерговитрат.

Результати та їх обґрунтування.

Для верифікації розробленої математичної моделі та кількісної оцінки ефективності методів динамічного моделювання процедурно-багатофакторної оптимізації потокового управління було проведено розрахунковий експеримент. Об'єктом моделювання обрано типовий проєкт зведення 5-поверхового енергозберігаючого цивільного будинку загальною корисною площею 6 000 м².

Процес оптимізації організаційно-технологічних рішень (ОТР) здійснювався за розробленим ітераційним алгоритмом, який включав наступні етапи: 1) ідентифікація вихідних параметрів об'єкта; 2) генерація множини допустимих ОТР у межах нормативних обмежень; 3) динамічний розрахунок енерговитрат на стадії будівництва ($E_{\text{буд}}$) із кроком симуляції в одну робочу зміну; 4) обчислення прогнозного експлуатаційного енергоспоживання ($E_{\text{експ}}$); 5) перевірка граничних обмежень за вартістю та часом; 6) розрахунок інтегрального критерію та вибір оптимального сценарію.

У межах експерименту здійснювався порівняльний аналіз двох базових сценаріїв організації будівництва:

1) Варіант А (Традиційна технологія): базується на класичних лінійних методах календарного планування з послідовним виконанням робіт. Цей сценарій характеризується наявністю технологічних розривів між процесами монтажу огорожувальних конструкцій, утеплення та герметизації. Рівень індустріалізації монтажу (параметр x_3) є базовим, процеси виконуються переважно «мокрим» способом безпосередньо на будівельному майданчику, що зумовлює тривалі періоди відкритого теплового контуру будівлі.

2) Варіант В (Індустріалізований монтаж та потокове управління): сукупність ОТР, що передбачає високий ступінь заводської готовності елементів, перехід до потоково-паралельних методів монтажу та максимальну механізацію процесів. Модель потокового управління в цьому варіанті жорстко синхронізує операції (максимізація коефіцієнта синхронізації $k_{\text{син}}$) для усунення організаційних простоїв механізмів та бригад. Ключовою технологічною відмінністю є алгоритмічне мінімізування часу $t_{\text{пер}}$ (періоду без замкнутого теплового контуру), що безпосередньо впливає на непродуктивні тепловтрати під час зведення.

Результати симуляційного розрахунку ключових параметрів життєвого циклу об'єкта для обох варіантів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна багатофакторна оцінка ефективності організаційно-технологічних рішень

Показник	Варіант А (Традиційна технологія)	Варіант В (Індустріалізований потоковий монтаж)	Відхилення (Δ), %
Енерговитрати на стадії зведення ($E_{\text{буд}}$), МВт·год	420	310	- 26,2 %

Прогнозні експлуатаційні енерговитрати ($E_{\text{експ}}$), МВт·год/рік	185	120	- 35,1 %
Тривалість будівництва (T), міс.	14	11	- 21,4 %
Кошторисна вартість (C), млн грн	98	102	+ 4,08 %

Як свідчать дані розрахунку, перехід до індустріалізованого потокового монтажу (Варіант В) генерує суттєвий синергетичний ефект у розрізі енергозбереження та часу. Зниження прямих енерговитрат на будівельному майданчику ($E_{\text{буд}}$) на 26,2% (з 420 до 310 МВт·год) досягається за рахунок двох ключових факторів. По-перше, потоково-паралельна організація усуває так звані «втрати» (waste) у вигляді холостих простоїв будівельної техніки. По-друге, синхронізація робіт дозволяє значно раніше сформувати закритий тепловий контур будівлі, що радикально зменшує енерговитрати на роботу тимчасових інженерних систем опалення та осушення приміщень у холодну пору року.

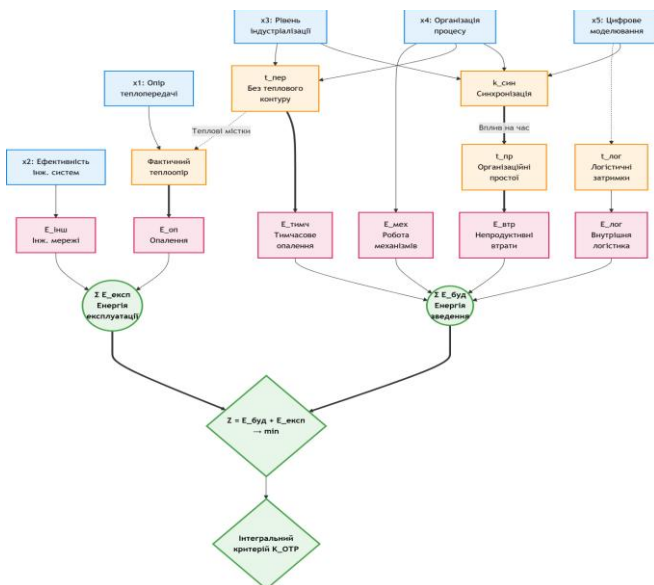


Рис. 1. Структурно-логічна схема динамічного моделювання процедурно-багатофакторної оптимізації організаційно-технологічних рішень при зведенні енергозберігаючих будівель

Найбільш вагомим результатом застосування потокового управління є зниження прогностичних експлуатаційних енерговитрат ($E_{\text{експ}}$) на 35,1% (з 185 до 120 МВт·год/рік). У традиційному Варіанті А розриви між етапами монтажу призводять до зволоження теплоізоляційних матеріалів та формування неконтрольованих теплових мостів. Натомість Варіант В, завдяки безперервному потоку та стандартизації індустріальних вузлів, гарантує збереження проєктного опору теплопередачі (x_1) та забезпечення нормативної повітронепроникності оболонки.

Збільшення кошторисної вартості зведення на 4,08% (з 98 до 102 млн грн) у Варіанті В пояснюється вищими початковими капіталовкладеннями у заводські індустріальні конструкції та впровадженням систем цифрового контролю. Проте це зростання математично компенсується скороченням накладних витрат завдяки зменшенню тривалості будівництва на 3 місяці (з 14 до 11 міс.), а в перспективі життєвого циклу об'єкта – багатократно окупається економією на експлуатаційних енергоносіях.

Оскільки покращення енергетичних та часових параметрів супроводжувалося незначним збільшенням вартості, для остаточного обґрунтування доцільності впровадження розроблених рішень було застосовано інтегральний критерій ефективності ($K_{\text{отр}}$). Враховуючи імперативи сталого розвитку, у моделі встановлено стратегічний пріоритет показника енергозбереження через систему вагових коефіцієнтів: $\alpha = 0,6$ (енергетична ефективність), $\beta = 0,25$ (час), $\gamma = 0,15$ (вартість).

Розрахунок інтегрального критерію показав наступні результати:

1) Для Варіанта А: $K_A = 0,6 \cdot 0,78 + 0,25 \cdot 0,79 + 0,15 \cdot 1,04 = 0,84$.

2) Для Варіанта В: $K_B = 0,6 \cdot 1,20 + 0,25 \cdot 1,00 + 0,15 \cdot 0,98 = 1,11$.

Отримане співвідношення $K_B > K_A$ (1,11 > 0,84) беззаперечно доводить, що незважаючи на локальне зростання прямих фінансових витрат, глобальна організація індустріалізованого потокового монтажу є математично та функціонально оптимальною.

Отримані результати підтверджують ефективність інтеграції динамічного моделювання процедурно-багатофакторної оптимізації потокового управління безпосередньо в процес управління енергоефективним будівництвом. Традиційне управління проєктами розглядає тривалість, вартість і якість як конкуруючі вершини «проєктного трикутника». Проте розроблена динамічна потокова модель доводить, що в контексті зведення nZEB-будівель усунення організаційних простоїв не лише скорочує терміни, але й виступає прямим інструментом захисту проєктного енергетичного потенціалу об'єкта.

Висновки та рекомендації подальшого дослідження.

На основі проведеного дослідження доведено, що системний розрив між розрахунковими (проєктними) та фактичними експлуатаційними показниками енергоефективності цивільних будівель має переважно організаційно-технологічну природу. Традиційні дискретні методи календарного планування не здатні забезпечити належний рівень синхронізації процесів, що неминуче призводить до технологічних простоїв, порушення цілісності теплового контуру та, як наслідок, незворотних втрат енергоефективності об'єкта. Для розв'язання цієї проблеми було розроблено комплексний математичний інструментарій оптимізації організаційно-технологічних рішень (ОТР), який вперше безпосередньо інтегрує методи системного динамічного моделювання

процедурно-багатофакторної оптимізації та принципи потокового управління (Lean Construction). Запропонована цільова функція дозволяє мінімізувати сукупні енерговитрати будівлі шляхом алгоритмічного усунення непродуктивних втрат часу та ресурсів безпосередньо на будівельному майданчику. Проведений розрахунковий експеримент повністю підтвердив високу ефективність розробленої моделі. Зокрема, доведено, що перехід до індустріалізованого монтажу та потоково-паралельної організації робіт забезпечує скорочення прямих енерговитрат на стадії зведення на 26,2 % (з 420 до 310 МВт·год) та зниження прогнозного експлуатаційного енергоспоживання на 35,1 % (з 185 до 120 МВт·год/рік), при цьому загальна тривалість будівництва скорочується на 21,4 %. Багтокритеріальна оцінка за допомогою інтегрального показника ефективності математично підтвердила безперечну доцільність впровадження індустріалізованого потокового монтажу ($K_B = 1,11$ проти $K_A = 0,84$). Отримані результати засвідчують, що застосування методів динамічного моделювання успішно трансформує управління будівельними потоками у дієвий механізм гарантування проєктної енергоефективності, що цілком відповідає пріоритетам сталого розвитку галузі.

Перспективи подальших досліджень. Подальший розвиток цієї проблематики доцільно спрямувати на інтеграцію розробленої математичної моделі динамічного моделювання процедурно-багатофакторної оптимізації потокового управління із середовищами інформаційного моделювання будівель (4D/5D BIM), що дозволить створити автоматизовані програмні комплекси для моніторингу будівельних потоків у режимі реального часу. Крім того, перспективним напрямом є розширення системи керованих змінних моделі шляхом урахування стохастичних кліматичних факторів та логістичних ризиків нестабільних ланцюгів постачання.

Список літератури:

1. Про енергетичну ефективність будівель : Закон України від 22.06.2017 р. № 2118-VIII. *Відомості Верховної Ради України*. 2017. № 33. С. 359.
2. Пастухова С. В., Арутюнян І. А. Удосконалення організаційно-технологічних рішень з урахуванням принципів енергоефективності та сталого розвитку в цивільному будівництві. *Містобудування та територіальне планування*. 2023. Вип. 85. С. 112–125.
3. Chen Y., Luo H., Wang X. BIM-based optimization of camera placement for indoor construction monitoring considering the construction schedule. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 129. P. 103825. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103825.
4. Rother M., Shook J. Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda. Brookline : Lean Enterprise Institute, 2003. 102 p.
5. Cano S., Rubiano O. Dynamics Model of the Flow Management of Construction Projects: Study of Case. *Proceedings of the 28th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC28)*. Berkeley, California, USA, 2020. P. 1045–1056. DOI: 10.24928/2020/0110.
6. Mota B., Viana D., Isatto E. Simulating the Last Planner with Systems Dynamic. *Proceedings of the 18th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC-18)*. Haifa, Israel, 2010. P. 211–220.
7. Cho J., Lim T., Kim B. Evaluation of air distribution system's airflow

performance for cooling energy savings in high-density data centers. *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 67. P. 665–675. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.09.013.

SusannaPASTUKHOVA, IrynaARUTIUNIAN

Dynamic modeling of flow management as a tool for improving organizational and technological solutions and sustainable development in civil engineering

The article thoroughly examines the problematic issues of ensuring designed energy efficiency of civil buildings directly at the construction stage by improving organizational and technological solutions.

Traditional approaches to construction flow management are analyzed in detail, and key reasons for the "gap" between calculated and actual energy consumption are identified, which lie in uncontrolled technological deviations, logistical delays, and organizational downtime.

Special attention is paid to the development of mathematical tools for an optimization model based on system dynamics methods and flow management principles. A system of controlled variables and an objective function for minimizing integral energy costs have been established, formalizing the direct correlation between the duration of work, non-productive time losses on-site, and the total energy costs of construction and subsequent operation.

The research results, verified through a computational experiment, prove the advantage of industrialized assembly and flow-parallel organization of work. The application of the optimized model allowed for reducing energy costs at the construction stage from 420 to 310 MWh, decreasing the total duration of work from 14 to 11 months, and significantly increasing the integral efficiency criterion of organizational and technological solutions (from 0.84 to 1.11).

Ultimately, it is proven that dynamic modeling of flow management transforms scheduling from a time-control tool into a scientifically grounded mechanism for guaranteeing an object's energy efficiency, which is critical for achieving sustainable development goals in modern civil engineering.

Keywords: organizational and technological solutions, energy-saving civil buildings, dynamic modeling, flow management, sustainable development, industrialized assembly, system dynamics, mathematical optimization, energy efficiency, lean construction.