

МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗВЕДЕННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

Стаття присвячена дослідженню методів моделювання технологічних процесів зведення будівель і споруд. Підкреслено актуальність дослідження та розробки методів моделювання технологічних процесів з метою підвищення ефективності використання будівельних технологій. Проведено огляд існуючих методів описання технологічних процесів зведення будівель (споруд) та обґрунтовано доцільність дослідження та розробки методик, що враховують різноманітні конструктивно-технологічні чинники. Наведено основні принципи математичного та фізичного моделювання та основні технологічні параметри, що становлять об'єкт дослідження. Розглянуто особливості теоретико-експериментальних методів досліджень. Проведено аналіз існуючих методів описання технологічних процесів (графіки, циклограми, графи зв'язку та ін.), підкреслено їхні переваги та недоліки. Запропоновано структурну N – мірну конструктивно-технологічну модель процесу зведення будівлі (споруди), що поєднує конструктивні рішення будівлі, інженерних систем, оптимізацію технологічних рішень в загальній організаційній структурі будівництва. Акцентовано увагу на тому, що вибір технологічних рішень в умовах зведення будівлі (споруди) базується на розумінні того факту, що необхідно розглядати процес зведення як комплексну модель взаємодії різнотипних систем, кожна з яких має набір параметрів, що змінюються в часі і просторі. В запропонованій конструктивно-технологічній моделі в якості вихідних даних слугує розроблена конструктивна числова 3D модель будівлі, інженерно-геологічні, технологічні умови та обмеження а також умови стосовно інженерних систем та комунікацій. Технологічні чинники в розрахунковій моделі (алгоритм організації процесів; людський ресурс; засоби механізації; алгоритм поділу фронту робіт на захватки, ділянки та ін.) представлено у вигляді n -мірних матриць. Запропонована структурна схема побудови N – мірної моделі дозволить врахувати змінні технологічні параметри процесу зведення будівель, пошуку оптимальних рішень, інтеграції технологічних рішень в сучасне програмне забезпечення а також можливості створення підґрунтя для використання роботизованих систем та комплексів.

Ключові слова: *методи моделювання, математична модель, технологічний процес, технологічні параметри.*

Вступ. Технологічні процеси зведення будівель і споруд представляють собою складні фізичні процеси, змінні в просторі і часі. Крім того технологія зведення будівель і споруд залежить від багатьох чинників: навколишнє середовище (температурно-вологісний режим), стан та властивості ґрунту, конструктивні особливості будівлі, будівельні матеріали, рівень механізації, автоматизації та

організації технологічних процесів, економічні чинники та інші [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Рішення проблеми опису таких складних систем дає метод математичного моделювання, що базується на стратегії системного аналізу, сутність якої полягає в представленні процесу як складної взаємодіючої ієрархічної системи з наступним якісним аналізом її структури, розробкою математичного опису й оцінкою невідомих параметрів з метою створення математичних моделей, що дадуть можливість розробки більш ефективних технологій зведення будівель і споруд [5, 6, 8].

Актуальність. В умовах будівництва недостатня достовірність представлення організаційно-технологічної моделі зведення будівлі (споруди) призводить до неоптимального застосування сучасних будівельних технологій, і, як наслідок, збільшення фінансових, трудових та матеріально-технічних витрат. Відомі на сьогоднішній день методи моделювання дозволяють створювати достатньо коректні моделі структури технологічних процесів, проте питання врахування різноманітних чинників зі змінними параметрами, пошуку оптимальних рішень для кожного конкретного об'єкту будівництва, інтеграції технологічних рішень в сучасне програмне забезпечення а також можливості створення підґрунтя для використання роботизованих систем та комплексів залишається актуальним.

Постановка проблеми. Процес зведення будівель та споруд представляє собою складний комплекс проектних, будівельних, монтажних та інших, що виконуються в певній технологічній послідовності, характеризуються великою кількістю варіантів технологічних та організаційних рішень. Сучасні будівлі та споруди повинні забезпечувати не лише міцність, стійкість, надійність, економічність, безпеку але й оптимальне їх поєднання за критеріями витрат праці, часу, ресурсів, вибору найкращих технологічних рішень для максимального задоволення потреб суспільства. Задача є актуальною як на етапі проектування так і на етапі зведення, експлуатації, знесення (демонтажу) будівлі або споруди.

Мета дослідження: аналіз та розробка методів математичного моделювання технологічних процесів зведення будівель з урахуванням організаційно-технологічних параметрів.

Основний матеріал. Побудова та дослідження математичних моделей є одним з пріоритетних напрямків сучасних досліджень в галузі будівництва. В процесі аналізу та розробки організаційно-технологічних закономірностей процесів зведення будівель та споруд виникає необхідність будувати все більш складні математичні моделі, які потребують універсального математичного апарату. Математичне моделювання є одним з основних сучасних методів дослідження систем. Зазвичай воно передбачає створення концептуальної моделі об'єкта дослідження, її формалізацію та перетворення у математичну або комп'ютерну модель, перевірку адекватності й подальше дослідження отриманої моделі за допомогою аналітичних або чисельних методів і сучасних комп'ютерних технологій. Застосування методів моделювання часто дає змогу отримати більш точні відомості про поведінку й характеристики досліджуваних систем і процесів, ніж при їх безпосередньому вивченні, витрачаючи при цьому менше часу та коштів.

Рішення проблеми опису таких складних систем дає метод математичного моделювання, що базується на стратегії системного аналізу, сутність якої полягає в представленні процесу як складної взаємодіючої ієрархічної системи з

наступним якісним аналізом її структури, розробкою математичного опису й оцінкою невідомих параметрів.

Побудову моделі починають з фізичного опису об'єкта моделювання (конструктивно-технологічної схеми процесу зведення будівлі або споруди). При цьому виділяють "елементарні" процеси, що протікають в об'єкті моделювання і які підлягають відображенню в моделі. Взаємозв'язок «елементарних» процесів може бути надзвичайно складним. Тому на практиці часто роблять різні допущення щодо характеру зв'язків, що дозволяє уникнути необхідності введення в модель недостатньо вивчених залежностей і, отже, зайвого ускладнення опису.

На етапі складання математичного опису попередньо виділяють основні явища й елементи в об'єкті і потім установлюють зв'язок між ними. Далі, для кожного виділеного елемента і явища записують рівняння (або систему рівнянь), що відображає його функціонування. Виходячи з реальних технологічних процесів математичний опис може бути представлений у вигляді системи алгебраїчних, диференціальних, інтегральних і інтегро-диференціальних рівнянь.

Етап вибору методу рішення і розробки моделюючої програми полягає у виборі найбільш ефективного методу рішення з наявних (під ефективністю маються на увазі швидкість одержання і точність рішення) і реалізацію його спочатку у формі алгоритму рішення, а потім – у формі комп'ютерної програми.

Для перевірки адекватності математичної моделі реальним процесам потрібно порівняти результати вимірів параметрів на об'єкті (будівлі чи споруді в процесі зведення) в з результатами прогнозування на основі моделі в ідентичних умовах. Для цього використовується апарат математичної статистики.

При проектуванні технологічних систем також використовується метод математичного моделювання – імітаційне моделювання. Сутність методу полягає у заміні реальної системи цифровою моделлю та моделюванні на ній процесів функціонування реальної виробничої системи.

Фізико-математичне моделювання включає наступні взаємозалежні етапи: вибір фізичної моделі; складання математичного опису досліджуваного об'єкта; вибір методу рішення системи рівнянь математичного опису і реалізація його у формі моделюючої програми; установлення відповідності (адекватності) моделі об'єктові.

Існують аналітичний, експериментальний і експериментально-аналітичний методи моделювання.

Аналітичні методи дозволяють отримати математичні рівняння стану системи на основі теоретичного аналізу фізичних та економічних процесів, що відбуваються в досліджуваному об'єкті, а також на основі заданих конструктивно-технологічних параметрів об'єкта досліджень. Параметри (коефіцієнти) складених рівнянь функціонально залежать від визначальних конструктивних та технологічних чинників (конструктивна схема будівлі, обрана технологія зведення, матеріали, засоби механізації, система організації виробничих процесів та ін.). Деякі параметри рівнянь можуть бути визначені розрахунковими шляхом, інші знаходяться за допомогою принципу подібності за результатами раніше виконаних досліджень. До недоліків аналітичних методів складання математичного опису можна віднести складність рішення системи рівнянь, яка збільшується при досить повному описі об'єкта.

Експериментальні методи складання математичного опису використовується для керування і дослідження об'єктів у вузькому, "робочому" діапазоні зміни

вхідних і вихідних змінних. Ці методи найчастіше ґрунтуються на припущенні про лінійність і зосередженість параметрів об'єкта. Прийняття цих припущень дозволяє порівняно просто описувати процеси, що спостерігаються, алгебраїчними або лінійними диференціальними рівняннями з постійними коефіцієнтами. При експериментальному підході до складання математичного опису завжди потрібна постановка дослідів безпосередньо на досліджуваному об'єкті. Достоїнством експериментальних методів є простота одержання математичної моделі при досить точному описі властивостей об'єкта у вузькому діапазоні зміни параметрів. Основний недолік експериментальних методів — неможливість встановлення функціонального зв'язку між вхідними параметрами і конструктивними характеристиками об'єкта, параметрами методів та режимів технологічних процесів.

Сьогодні моделювання систем найчастіше реалізують за допомогою сучасних комп'ютерних технологій. Такий підхід передбачає необхідність попередньої формалізації концептуальної моделі об'єкта дослідження та її подання у вигляді, придатному для реалізації тих чи інших алгоритмів чисельного аналізу або комп'ютерної імітації.

На сьогоднішній день існує велика кількість фізичних, математичних, імітаційних, графічних (сіткові графіки, циклограми) та інших методів моделювання складних технологічних процесів. Серед них добре відома методика інформаційного моделювання в будівництві (BIM) в основі якої є концепція об'єктно-орієнтованого параметричного проектування (моделювання) будівель. Варто зазначити, що концепція BIM передбачає створення єдиної цифрової моделі будівлі на всіх етапах її життєвого циклу, тобто проектування (планування, дизайн, документування); зведення (будівельні технології, час, ресурси, організація); експлуатація (система ремонтів, реконструкція, утилізація).

Одним з методів описання складного характеру взаємодії структурних складових системи є метод теорії графів, тобто метод візуальної ілюстрації даних та відношень між ними. Мета графів - представити занадто численні, або складні дані, для їх адекватного опису в тексті, або алгоритмі. Забезпечення чіткості та коректності опису даних у графах забезпечують ефективність використання графів.

Також варто відмітити метод передаточних функцій або метод «чорного ящика», що використовується для лінійних стаціонарних динамічних систем і представляє собою відношення величини (результату) на виході (системи або окремого процесу) до величини (характеру дій або початкових умов) на вході.

Системний підхід для вирішення задач моделювання технологічних процесів припускає послідовний перехід від загального до часткового, коли в основі розгляду лежить єдина мета дослідження. Основні вимоги системного підходу можна сформулювати так: правильна локалізація проблеми; визначення найбільш повних границь дослідження даної проблеми; оцінка можливих невизначеностей і методів їхнього зменшення; вибір критеріїв добору елементів, що входять у створювану модель; виявлення альтернативних моделей і рішень; адекватність моделі і ступінь експериментальної перевірки результатів. Побудову моделі починають з фізичного опису об'єкта моделювання. При цьому виділяють «елементарні» процеси, що протікають в об'єкті моделювання і які підлягають відображенню в моделі. Формулюють основні допущення, прийняті при їхньому описі.

На рис. 1 наведено схему структурних зв'язків технології зведення будівлі (споруди) з технологічними та організаційними параметрами процесів.

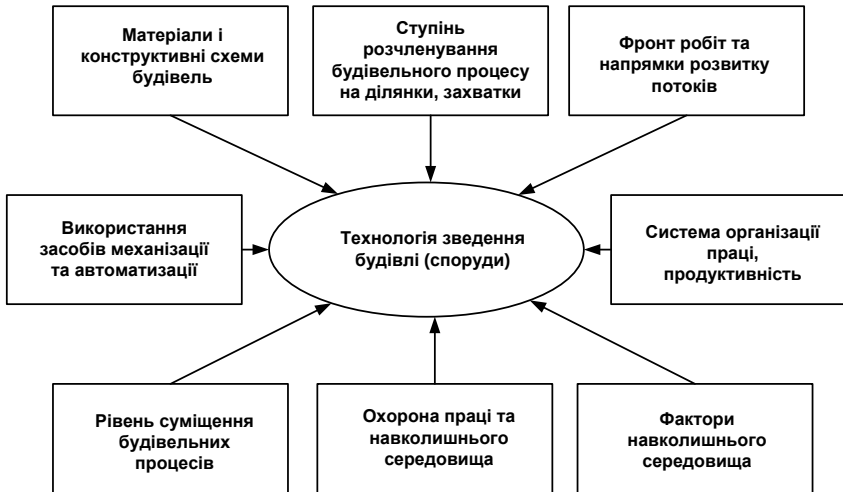


Рис. 1. Структурні зв'язки в технології зведення будівлі (споруди)

В цілому конструктивно-технологічну структуру процесу зведення будівлі (споруди) можна представити у вигляді N – мірної моделі (рис. 2). У якості вихідних даних слугує розроблена конструктивна числова 3D модель будівлі, інженерно-геологічні, технологічні умови та обмеження а також умови стосовно інженерних систем та комунікацій. На наступному етапі генерується множина можливих технологічних рішень, кожне з яких має вхідний масив даних: алгоритм (схему) організації процесів; людський (трудоий) ресурс; засоби механізації; алгоритм (схему) поділу фронту робіт на захватки, ділянки.

Після обробки даних отримуємо N – мірну матрицю конструктивно-технологічних параметрів процесу зведення будівлі, далі можна застосувати алгоритм оптимізації для обробки масиву і даних і вибору найкращого варіанту застосування технологічних рішень за сукупністю критеріїв. Наступний крок – візуалізація і параметризація технологічних рішень, тобто представлення інформації у зручному вигляді для візуальної оцінки та для подальшої обробки (матриці, графіки, таблиці, циклограми). Система зворотного зв'язку завершує логічну структуру і дозволяє відстежувати результати прийнятих рішень та ефективно керувати процесом зведення.

Коректне описання та взаємозв'язок «елементарних» будівельних процесів може бути надзвичайно складним. Тому на практиці часто роблять різні припущення щодо характеру зв'язків, що дозволяє уникнути необхідності введення в модель недостатньо вивчених залежностей і, отже, зайвого ускладнення опису. Будь-яка можлива модель, що може бути використана для описання організаційно-технологічних структурних динамічних зв'язків, що

виникають в процесі зведення будівель і споруд має свої переваги та недоліки, ступінь відповідності реальним фізичним процесам.

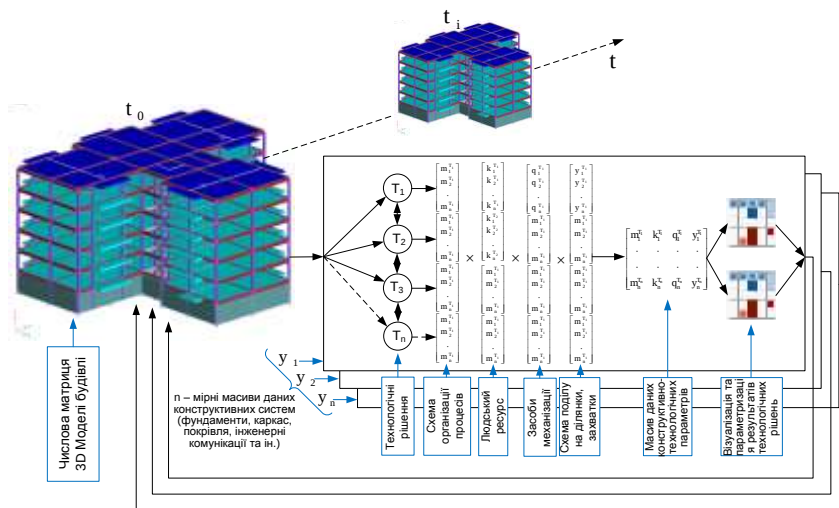


Рис. 2. N – мірна конструктивно-технологічна модель процесу зведення будівлі (споруди)

Важливим є питання оптимального вибору складності, адекватності моделі і відповідно точності та прогнозованості отриманих результатів, оскільки достатньо широке теоретичне узагальнення не дає в повній мірі описати характер фізичних процесів, з іншого боку занадто громіздка фізико-математична модель буде потребувати значних ресурсів інформаційної системи і не дасть можливості бути інтегрованою в існуючі системи інформаційного моделювання.

Висновки:

1. Проведено аналіз існуючих методик описання технологічних процесів в будівництві з використанням теоретико-експериментального апарату досліджень.
2. Огляд існуючих методів моделювання технологічних процесів зведення будівель (споруд) виявив доцільність дослідження методів математичного та фізичного моделювання з ціллю розробки більш ефективних методів застосування будівельних технологій.
3. Запропоновано структурну N – мірну конструктивно-технологічну модель процесу зведення будівлі (споруди), що поєднує конструктивні рішення будівлі, інженерних систем, оптимізацію технологічних рішень в загальній організаційній структурі будівництва.

Список літератури:

1. Басараб В.А., Уманець І.М., Саушева Л.С. Методика вибору комплексу засобів ущільнення ґрунту пазах котлованів і траншей за технічною ознакою.

Основи та фундаменти. 2021. Вип. 43. С. 67-78. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.43.2021.67-78>

2. Уманець І.М., Басараб В.А. Моніторинг технічного стану будівель та споруд в умовах експлуатації. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2023. № 51 (1). С. 194-205. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51\(1\).194-205](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51(1).194-205)

3. Молодід О.О., Тонкачев Г.М., Молодід О.С. Методика впровадження у будівництво нових конструктивно-технологічних рішень з відновлення будівельних конструкцій. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2018. № 37. С. 163-171.

4. Махия О.М., Глушенко І.В., Басараб В.А. Основи формування чисельного складу комплексної бригади мулярів-монтажників. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2022. Вип. 11. С. 115-124. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.115-124>

5. Осипов А.Ф. Основные принципы проектирования динамически трансформирующихся технологических систем. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2000. Вип. 67. С. 162-165.

6. Терновий В.І., Уманець І.М. BIM у технології будівельних процесів. *Будівельне виробництво*. 2019. № 67. С. 37-40. <https://doi.org/10.36750/2524-2555.67.37-40>

7. Tonkacheiev H.M., Molodid O.S., Galinskiy O.M., Plokhuta R.O., Rudnieva I.M., Priadko I.M. The technology of crack repair by polymer composition. *Onir матеріалів і теорія споруд*. 2022. №108. С. 203-216. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.108.203-216

8. Honcharenko T., Shpakova H., Predun K., Zinchenko M., Liashchenko M., Savenko V. Smart Information System for Creating Digital Twins of Construction Project. *IEEE 2022 International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, 28-30.04.2022. DOI: 10.1109/SIST54437.2022.9945785

References:

1. Basarab, V., Umanets, I., & Sausheva, L. (2021). Methods of choosing a set of means for com-pacting the soils of the sinuses of ditches and trenches on a technical basis. *Bases and Foundations*, (43), 67–78. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.43.2021.67-78> [in Ukrainian].

2. Umanets, I., & Basarab, V. (2023). Monitoring of the technical condition of buildings and structures under operational conditions. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 51(1), 194–205. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51\(1\).194-205](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51(1).194-205) [in Ukrainian].

3. Molodid, O., Tonkacheiev, H., & Molodid, O. (2018). Methodology of introducing new structural and technological solutions for the restoration of building structures into construction. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 37, 163-171. [in Ukrainian].

4. Makhynya, O., Hluschenko, I., & Basarab, V. (2022). The fundamentals of forming the numerical composition of the complex brigade of mason-installers. *Building Constructions. Theory and Practice*, (11), 115–124. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.115-124> [in Ukrainian].

5. Osypov, O. (2000). Basic principles of designing dynamically transforming technological systems. *Prykladna gheometrija ta inzhenerna ghrafka*, 67, 162-165 [in Ukrainian].

6.Ternoviy, V., Umanets, I. (2019). BIM in technology of construction processes. *Building production*, 67, 37-40. <https://doi.org/10.36750/2524-2555.67.37-40> [in Ukrainian].

7.Tonkacheiev, H., Molodid, O., Galinskyi, O., Plokhuta, R., Rudnieva, I., & Priadko, I. (2022). The technology of crack repair by polymer composition. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 108, 203-216. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.108.203-216

8.Honcharenko, T., Shpakova, H., Predun, K., Zinchenko, M., Liashchenko, M., & Savenko, V. (2022). Smart Information System for Creating Digital Twins of Construction Project. *IEEE 2022 International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, 28-30.04.2022. DOI: 10.1109/SIST54437.2022.9945785.

Volodymyr BASARAB

Methods of modeling technological processes of construction of buildings and structures

The article is devoted to the study of methods for modeling technological processes of building and construction. The relevance of research and development of methods for modeling technological processes in order to increase the efficiency of the use of construction technologies is emphasized. A review of existing methods for describing technological processes of building (structure) construction was conducted and the feasibility of researching and developing methods that take into account various structural and technological factors was substantiated. The basic principles of mathematical and physical modeling and the main technological parameters that constitute the object of research are presented. The features of theoretical and experimental research methods are considered. An analysis of existing methods for describing technological processes (graphs, cyclograms, communication graphs, etc.) was conducted, and their advantages and disadvantages were highlighted. A structural N-dimensional constructive and technological model of the building (structure) construction process is proposed, which combines constructive solutions of the building, engineering systems, and optimization of technological solutions in the general organizational structure of construction. Attention is focused on the fact that the choice of technological solutions in the context of the construction of a building (structure) is based on the understanding of the fact that it is necessary to consider the construction process as a complex model of the interaction of different types of systems, each of which has a set of parameters that change in time and space. In the proposed structural and technological model, the developed structural numerical 3D model of the building, engineering and geological, technological conditions and limitations, as well as conditions regarding engineering systems and communications serve as the initial data. Technological factors in the calculation model (process organization algorithm; human resources; mechanization tools; algorithm for dividing the work front into sections, areas, etc.) are presented in the form of n-dimensional matrices. The proposed structural scheme for constructing an N-dimensional model will allow taking into account the variable technological parameters of the building construction process, the search for optimal solutions, the integration of technological solutions into modern software, as well as the possibility of creating a basis for the use of robotic systems and complexes.

Keywords: *modeling methods, mathematical model, technological process, technological parameters.*