

Київський національний університет будівництва і архітектури
Міністерство освіти та науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГАЛЕНКО ЄВГЕНІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 693.5; 624.1

ДИСЕРТАЦІЯ
ТЕХНОЛОГІЯ ГРАВІТАЦІЙНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ АРМОБЕТОННИХ
КОНСТРУКЦІЙ

192 – Будівництво та цивільна інженерія

19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Науковий керівник (консультант) **Махія Олександр Миколайович**, кандидат технічних наук, доцент

Київ - 2025

АНОТАЦІЯ

Галенко Є.О. Технологія гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 19 — Архітектура та будівництво, за спеціальністю 192 — Будівництво та цивільна інженерія. — Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2025.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню проблемного питання з поліпшення якості підземних стінових конструкцій та ефективності їх зведення з рівня поверхні ґрунту за рахунок застосування методу гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій.

В дисертаційній роботі розкрита актуальність проблемного питання, яке полягає у тому, що при застосуванні найбільш ефективної технології зведення підземних вертикальних стінових конструкцій — «стіни в ґрунті» відсутня можливість контролю та забезпечення якості монолітних і збірно-монолітних конструкцій в процесі їх зведення, а при застосуванні збірних конструкцій збільшується кількість стиків між окремим конструктивними елементами, влаштування яких ускладнене та не забезпечує стабільний рівень якості стінових конструкцій, що відповідно збільшує витрати на усунення їх дефектів.

Одним зі шляхів вирішення цього проблемного питання є застосування технології гравітаційного видавлювання армобетонних вертикальних стінових конструкцій підземних споруд, який дозволить контролювати якість виготовлених конструкцій до опускання їх в траншею, а за рахунок відсутності обмежень габаритів, як у збірних конструкціях, зменшить кількість стиків між конструктивними елементами.

Технологія гравітаційного видавлювання передбачає зведення вертикальних підземних стінових армобетонних (залізобетонних) конструкцій у попередньо викопаній траншеї, що заповнена глинистим розчином. Стінова

конструкція виготовляється у нерухомій опалубній модуль-формі на рівні поверхні ґрунту.

Під час виготовлення конструкція поступово видавлюється з модуль-форми під власною вагою виготовленої частини стіни та вагою шарів бетонної суміші, які укладаються в процесі безперервного бетонування. Після видавлювання конструкції з опалубної модуль-форми виконується контроль якості виготовленої конструкції. Частина стінової конструкції, що виходить із опалубки, безперервно опускається до траншеї та після досягнення проєктної відмітки закріплюється у проєктному положенні.

Аналіз публікацій та відомого практичного досвіду показав, що цим проблемним питанням займалися багато вчених та інженерів. Необхідно зазначити, що у проаналізованих працях розглянуто основні аспекти зведення підземних споруд, зокрема технології «стіна в ґрунті». Відзначено високу ефективність застосування технології «стіни в ґрунті» при зведенні підземних споруд глибокого закладання в умовах щільної міської забудови. Технологія «стіна в ґрунті» характеризується застосуванням пальових і стінових (монолітних, збірних та збірно-монолітних) конструкцій.

Найбільш широкого застосування набула технологія влаштування стінових монолітних конструкцій, що пов'язано з відносно невеликою кількістю процесів та операцій, які виконуються на будівельному майданчику, та з відсутністю потреби в організації виробничої бази для виготовлення збірних конструкцій.

При цьому виявлено, що влаштування монолітної стінової конструкції виконується шляхом укладання бетонної суміші на значну глибину під шаром глинистого розчину, що поступово витісняється з траншеї. В результаті цього можливе перемішування бетонної суміші із глинистим розчином та навколишнім ґрунтом, а також налипання глини на арматурний каркас, що, зі свого боку, веде до значного зниження якості стінової конструкції.

На підставі аналізу можливих рішень щодо поліпшення якості підземних вертикальних стінових конструкцій, що зводяться з рівня поверхні ґрунту, було

зроблено припущення, що застосування технології гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій (відомого за патентом на спосіб зведення монолітної будівельної конструкції) дозволить значно поліпшити якість підземних стінових конструкцій та підвищити продуктивність процесу. Відповідно до цієї робочої гіпотези обрана мета дослідження — підвищення ефективності технології влаштування стін в ґрунті шляхом обґрунтування та розроблення технології влаштування стінових армобетонних конструкцій методом гравітаційного видавлювання. Згідно мети дослідження було виконано аналіз технологій влаштування монолітних стін в ковзних опалубних системах, які за своїми принципами подібні до методу гравітаційного видавлювання.

Відповідно до робочої гіпотези був визначений об'єкт дослідження — технологія зведення підземних споруд за методом «стіна в ґрунті». Згідно з метою дослідження був сформований предмет дослідження — технологічні параметри процесів влаштування стін в ґрунті за методом гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій.

Розроблено методику дослідження та обрано відповідні методи дослідження, до яких віднесені: описовий, порівняльний (зіставлення й протиставлення), метод експертної оцінки, методи експериментального й організаційно-технологічного моделювання, формалізації, системно-структурного й статистичного аналізу та синтезу технічних рішень; теорії множини і теорії ймовірності.

Для обґрунтування технології гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій підземних споруд проведено систематизацію та дослідження факторів, що впливають на ефективність даної технології, яких було визначено значну кількість. Найбільш впливовими факторами на продуктивність і трудомісткість процесу виготовлення стінової конструкції методом гравітаційного видавлювання є геометричні розміри конструкції, час набирання розпалубної міцності, час початку тужавіння бетону.

Під час дослідження була розроблена модель комплексного процесу виготовлення стінової конструкції методом гравітаційного видавлювання з початку монтажу опалубної модуль-форми над попередньо влаштованою траншею, яка викопана за традиційним методом «стіна в ґрунті», до демонтажу модуль-форми після зведення стінової конструкції. Основними в комплексі робіт встановлені наступні процеси:

- монтаж опалубної системи гравітаційного видавлювання;
- стабілізація траншеї на період виконання робіт за допомогою глинистого розчину, що передбачає заміну глинистого розчину після викопування траншеї, його очищення та регенерацію;
- улаштування збірної частини стінової конструкції або опорної балки, на яку повинна обпиратися монолітна частина в процесі виготовлення конструкції;
- армування конструкції, що передбачає влаштування арматурного каркасу та встановлення необхідних закладних деталей;
- бетонування та поступове видавлювання конструкції до траншеї;
- вистоювання бетону передбачається після влаштування першого монолітного ярусу до набирання бетоном необхідної розпалубної міцності;
- виправлення можливих дефектів бетонування стінової конструкції після її видавлювання зі стаціонарної опалубної модуль-форми;
- фіксація стінової конструкції у проектному положенні;
- заповнення пазух між стіною конструкцією та стінками траншеї тампонажним матеріалом;
- демонтаж обладнання для влаштування підземної стінової конструкції.

На основі даної моделі було виконане дослідження впливу попередньо відібраних факторів на трудомісткість та продуктивність виготовлення стінової конструкції за методом гравітаційного видавлювання. В процесі аналізу нормативних документів щодо норм витрат праці і норм часу на виконання будівельних процесів встановлено, що існуючі норми не можуть бути використані для дослідження трудомісткості процесу виготовлення

стінових конструкцій методом гравітаційного видавлювання, а тому в дослідженні було використано метод цілочислового нормування, при якому окремий процес ділять на окремі операції та дії.

В процесі дослідження було встановлено, що влаштування першого ярусу стінової конструкції з бетону C25/30 (при температурі від +10 °C до +25 °C) повинно знаходитись в межах від 4 до 10 годин, що забезпечує необхідний час для досягнення бетоном потрібної міцності для початку видавлювання конструкції без можливого його зчеплення матеріалом палуби.

Виявлено, що швидкість опускання готової стінової конструкції повинна бути межах від 5 см/год до 25 см/год, що дозволяє забезпечити безперервність процесу бетонування при збереженні міцності щойно сформованого шару бетонної суміші та усунення можливого його зчеплення із матеріалом палуби. Це відповідає інтенсивності бетонування в межах від 12 м³/год до 20 м³/год. При зменшенні швидкості спостерігається збільшення тривалості циклу, що може призвести до перевищення граничного часу стійкості траншеї, а збільшення швидкості створює ризики для структурної цілісності конструкції через недостатній набір міцності бетоном.

Дослідження продуктивності виготовлення конструкції дозволили виявити аналітичні залежності продуктивності та трудомісткості процесу від геометричних розмірів конструкції, часу набирання розпалубної міцності, часу початку тужавіння бетону і часу набирання максимальної міцності бетоном, за якої ще відсутнє зчеплення з поверхнею палуби.

В результаті виконаного дослідження встановлено, що технологія гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій підземних споруд ефективна при влаштуванні вертикальних стінових конструкцій на глибину від 15 м до 25 м при застосуванні бетону за класом не нижче за C25/30 і температурі зовнішнього середовища в інтервалі від +10 °C до +25 °C. Також встановлено, що при глибинах більше 25 м необхідно застосовувати бетони з домішками, що прискорюють їх твердіння.

На підставі виконаного дослідження були надані рекомендації щодо практичного застосування технології гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій підземних споруд, щодо області застосування, послідовності виконання процесів, продуктивності і трудомісткості процесів.

Для практичної реалізації результатів дослідження розроблено технічне завдання щодо проектування опалубної модуль-форми методу гравітаційного видавлювання.

Наукова новизна результату дослідження у вигляді технології гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій стін в траншеях з глинистою суспензією характеризується наступними ознаками:

- *вперше* обґрунтовано конструктивні параметри стін в ґрунті й технологічні параметри процесу їх влаштування, за якими відкривається можливість використання методу гравітаційного видавлювання при забезпеченні підвищеної якості стін та продуктивності їх влаштування. До таких параметрів віднесено геометричні розміри та монтажна вага конструкції, час набирання розпалубної міцності, час початку тужавіння бетону, час набирання максимальної міцності бетоном, за якої ще відсутнє зчеплення з поверхнею палуби, а також залежності продуктивності та трудомісткості процесу виготовлення конструкції від її геометричних розмірів, часу набирання розпалубної міцності, часу початку тужавіння бетону та часу набирання максимальної міцності бетоном, за якої ще відсутнє зчеплення з поверхнею палуби;
- *удосконалено* конструктивно-технологічне рішення модуля-форми опалубки для реалізації нової технології гравітаційного видавлювання стін в ґрунті, знайдені основні конструктивні параметри опалубки, які є підґрунтям для її промислового виготовлення;
- *отримала подальший розвиток* теорія будівельних процесів в частині зведення підземних вертикальних стінових конструкцій та технології зведення підземних споруд.

Практична цінність роботи полягає у підвищенні ефективності технології влаштування стін в ґрунті шляхом обґрунтування та розроблення технології влаштування стінових армобетонних конструкцій методом гравітаційного видавлювання, що дозволяє конструкторам розробити конструктивні рішення опалубної модуль-форми гравітаційного видавлювання, проектувальникам розробляти відповідні технологічні карти, а будівельним організаціям реалізовувати технологію гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій підземних споруд. Застосування даної технології дозволить контролювати якість конструкції на етапі її виготовлення, що, зі свого боку, підвищить ефективність зведення підземних стінових конструкцій. Метод гравітаційного видавлювання дозволяє збільшити продуктивність процесу влаштування монолітних стін в ґрунті до 17 % і зменшити трудомісткість процесу до 9 %.

Ключові слова: підземне будівництво, стіна в ґрунті, монолітний бетон, глинистий розчин, гравітаційне видавлювання, будівельна оснастка, модуль-форма, технологічний процес, продуктивність, трудомісткість.

ABSTRACT

Halenko Y.O. Technology of gravitational extrusion of reinforced concrete structures. — Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 19 — Architecture and Construction, specialty 192 — Construction and Civil Engineering. — Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to solving the problem of improving the quality of underground wall structures and the efficiency of their construction from ground level by using the method of gravitational extrusion of reinforced concrete structures.

The dissertation reveals the relevance of the problem, which lies in the fact that when using the most effective technology for the construction of underground vertical wall structures — “diaphragm walls” it is not possible to control and ensure the quality of monolithic and prefabricated-monolithic structures during their construction, and when using prefabricated structures, the number of joints between individual structural elements increases, the arrangement of which is complicated and does not ensure a stable level of quality of wall structures, which accordingly increases the cost of eliminating their defects.

One way to solve this problem is to use the technology of gravitational extrusion of reinforced concrete vertical wall structures of underground structures, which will allow controlling the quality of manufactured structures before lowering them into the trench, and due to the absence of dimensional restrictions, as in prefabricated structures, will reduce the number of joints between structural elements.

Gravity extrusion technology involves the construction of vertical underground reinforced concrete (reinforced concrete) wall structures in a pre-dug trench filled with clay mortar. The wall structure is manufactured in a stationary formwork module at ground level.

During construction, the structure is gradually extruded from the module mold under the weight of the manufactured wall section and the weight of the layers of concrete mixture, which are laid in the process of continuous concreting. After the structure is pushed out of the formwork module, the quality of the manufactured structure is checked. The part of the wall structure that comes out of the formwork is continuously lowered into the trench and, after reaching the design mark, is fixed in the design position.

An analysis of publications and known practical experience has shown that many scientists and engineers have addressed this problematic issue. It should be noted that the analyzed works consider the main aspects of the construction of underground structures, in particular the “diaphragm wall” technology. The high efficiency of the “diaphragm wall” technology in the construction of deep

underground structures in dense urban areas has been noted. The “diaphragm wall” technology is characterized by the use of pile and wall (monolithic, prefabricated, and prefabricated-monolithic) structures.

The technology of constructing monolithic wall structures has become the most widely used, which is associated with a relatively small number of processes and operations performed at the construction site and the absence of the need to organize a production base for the manufacture of prefabricated structures.

At the same time, it has been found that the construction of a monolithic wall structure is carried out by laying concrete mixture to a considerable depth under a layer of clay mortar, which is gradually displaced from the trench. As a result, the concrete mixture may mix with the clay mortar and surrounding soil, and clay may stick to the reinforcement cage, which in turn leads to a significant reduction in the quality of the wall structure.

An analysis of methods for erecting underground vertical walls from ground level showed that applying gravity extrusion of reinforced concrete (as described in the monolithic-structure patent) can significantly enhance wall quality and boost productivity. Accordingly, this research aims to substantiate and develop an efficient gravity-extrusion technology for soil-based reinforced concrete walls by examining sliding formwork systems analogous to the gravity extrusion method.

In accordance with the working hypothesis, the object of the study was determined — the technology of constructing underground structures using the “diaphragm wall” method. In accordance with the purpose of the study, the subject of the study was formed — the technological parameters of the processes of constructing walls in the ground using the method of gravitational extrusion of reinforced concrete structures.

A research methodology was developed and appropriate research methods were selected, including: descriptive, comparative (comparison and contrast), expert assessment, experimental and organizational-technological modeling, formalization, systemic-structural and statistical analysis and synthesis of technical solutions; set theory and probability theory.

To justify the technology of gravitational extrusion of reinforced concrete structures of underground structures, a systematization and study of factors affecting the effectiveness of this technology was carried out, of which a significant number were identified. The most influential factors on the productivity and labor intensity of the wall construction manufacturing process using the gravity extrusion method are the geometric dimensions of the structure, the time required to achieve formwork strength, and the time required for the concrete to begin to harden.

During the study, a model of the complex process of manufacturing wall structures using the gravity extrusion method was developed, from the beginning of the installation of the formwork module over a pre-dug trench, which was dug using the traditional “diaphragm wall” method, to the dismantling of the module after the construction of the wall structure. The following processes were identified as the main ones in the complex of works:

- installation of a gravity extrusion formwork system;
- stabilization of the trench for the duration of the work using a clay solution, which involves replacing the clay solution after digging the trench, cleaning it, and regenerating it;
- installation of the prefabricated part of the wall structure or support beam, on which the monolithic part should rest during the construction process;
- reinforcement of the structure, which involves the installation of a reinforcement cage and the necessary embedded parts;
- concreting and gradual extrusion of the structure into the trench;
- concrete curing is provided after the installation of the first monolithic tier until the concrete reaches the required formwork strength;
- correction of possible defects in the concreting of the wall structure after it has been pushed out of the stationary formwork module;
- fixing the wall structure in the design position;
- filling the cavities between the wall structure and the trench walls with tamping material;

- dismantling of equipment for the construction of underground wall structures.

Based on this model, a study was conducted on the impact of pre-selected factors on the labor intensity and productivity of wall construction using the gravity extrusion method. In the process of analyzing regulatory documents on labor and time standards for construction processes, it was established that the existing standards cannot be used to study the labor intensity of the process of manufacturing wall structures using the gravity extrusion method, and therefore, the study used the integer standardization method, in which a separate process is divided into separate operations and actions.

The study found that the installation of the first tier of a wall structure made of C25/30 concrete (at a temperature of +10 °C to +25 °C) should take between 4 and 10 hours, which provides the necessary time for the concrete to achieve the required strength to begin extruding the structure without possible adhesion to the deck material.

It was found that the speed of lowering the finished wall structure should be between 5 cm/hour and 25 cm/hour, which ensures the continuity of the concreting process while maintaining the strength of the newly formed layer of concrete mixture and eliminating its possible adhesion to the deck material. This corresponds to a concreting intensity of between 12 m³/hour and 20 m³/hour. A decrease in speed leads to an increase in cycle time, which can result in the trench stability limit time being exceeded, while an increase in speed creates risks to the structural integrity of the structure due to insufficient concrete strength.

Studies of the productivity of the structure's manufacture have revealed analytical dependencies of the productivity and labor intensity of the process on the geometric dimensions of the structure, the time required to achieve formwork strength, the time required for the concrete to begin to set, and the time required for the concrete to achieve maximum strength, at which there is still no adhesion to the deck surface.

As a result of the study, it was established that the technology of gravity extrusion of reinforced concrete structures of underground structures is effective in

the construction of vertical wall structures at a depth of 15 m to 25 m when using concrete of a class not lower than C25/30 and an ambient temperature in the range from +10 °C to +25 °C. It was also established that at depths greater than 25 m, it is necessary to use concrete with additives that accelerate its hardening.

Based on the study, recommendations were made on the practical application of the technology of gravity extrusion of reinforced concrete structures of underground structures, on the scope of application, the sequence of processes, productivity, and labor intensity of processes.

For practical implementation of the research results, technical specifications have been developed for the design of a formwork module for the gravity extrusion method.

The scientific novelty of the research result in the form of a technology for gravity extrusion of reinforced concrete wall structures in trenches with clay suspension is characterized by the following features:

- installation of a gravity extrusion formwork system;
- *For the first time*, the design parameters of diaphragm wall and the technological parameters of their construction have been substantiated, opening up the possibility of using the gravity extrusion method while ensuring higher wall quality and construction productivity. These parameters include the geometric dimensions and installation weight of the structure, the time required to achieve formwork strength, the time required for the concrete to begin to set, the time required for the concrete to achieve maximum strength, at which there is still no adhesion to the deck surface, as well as the dependence of the productivity and labor intensity of the construction process on its geometric dimensions, the time required to achieve formwork strength, the time required for concrete to begin to set, and the time required for concrete to achieve maximum strength, at which point there is still no adhesion to the deck surface;
- *Has been improved* the structural and technological solution of the formwork module for the implementation of the new technology of gravitational extrusion

of diaphragm walls, and the main structural parameters of the formwork have been found, which are the basis for its industrial production.

- *Has been further developed* the theory of construction processes in terms of the erection of underground vertical wall structures and the technology of underground construction.

The practical value of the work lies in increasing the efficiency of the technology for constructing diaphragm walls by substantiating and developing the technology for constructing reinforced concrete wall structures using the gravity extrusion method, which allows designers to develop structural solutions for the formwork module for gravity extrusion, enabling designers to develop appropriate technological charts and construction organizations to implement the technology of gravity extrusion of reinforced concrete structures of underground structures. The use of this technology will allow the quality of the structure to be controlled at the stage of its manufacture, which, in turn, will increase the efficiency of the construction of underground wall structures. The gravity extrusion method allows increasing the productivity of the process of constructing monolithic diaphragm walls by up to 17% and reducing the labor intensity of the process by up to 9%.

Keywords: underground construction, diaphragm wall, monolithic concrete, clay mortar, gravity extrusion, construction equipment, module form, technological process, productivity, labor intensity.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у вітчизняних фахових виданнях (всі видання індексуються в міжнародних базах даних)

1. Махия О. М., Галенко Є. О. Палі-колони при зведенні будівель методом «вгору-вниз» (TOP-DOWN) // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин: зб. наук. праць. 2023. № 51(1). С. 78–92. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51\(1\).259-270](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51(1).259-270). (Журнал індексується в базах даних Наукова періодика України, Google Scholar). Особисто автором здійснено аналітичне узагальнення геометричних і конструктивних параметрів паль-колон при впровадженні технології «top-down» та обґрунтовано їх роль у стабільності процесу.
2. Галенко Є. О., Махия О. М. Класифікація ковзних опалубних систем // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин: зб. наук. праць. 2023. № 52(1). С. 157–170. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52\(1\).157-170](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52(1).157-170). (Журнал індексується в базах даних Наукова періодика України, Google Scholar). Особисто автором проведено систематизацію існуючих типів ковзних опалубок та розроблено класифікаційні ознаки для їх диференціації в контексті сучасного будівництва.
3. Махия О. М., Галенко Є. О. Теоретичні дослідження монтажної ваги армовидавлювальних конструкцій // Основи та фундаменти / Bases and Foundations. 2024. № 49. С. 77–85. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.49.2024.77-85>. (Журнал індексується в базах даних Google Scholar, Crossref). Особисто автором виконано розрахунок монтажної маси з урахуванням змін геометричних параметрів та конструктивних рішень, запропоновано узагальнену формулу для інженерної оцінки.
4. Галенко Є. О., Махия О. М. Дослідження факторів впливу на технологію зведення підземних конструкцій методом гравітаційного видавлювання // Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 1. С. 540–550. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.1>. (Журнал

індексується в базах даних Google Scholar, Crossref). Особисто автором виконано експертне оцінювання впливових факторів, проведено ранжування за значущістю та сформовано базу для побудови моделі процесу видавлювання.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації: тези доповідей на конференціях

5. Аналіз сучасного стану технології «вверх-вниз» (TOP-DOWN) при зведенні висотних будинків. Архітектура та Будівництво: нові тенденції і технології. Теорія і практика: програма та тези I Міжнар. наук.-техн. форуму. *Особисто автором Здійснено систематичний огляд та синтез існуючих публікацій і технічних звітів щодо застосування TOP-DOWN у висотному будівництві. Виконано порівняльний аналіз переваг і обмежень різних реалізацій технології на прикладі відомих проєктів.*

6. Аналіз параметрів будівель, що були зведені за технологією «вверх-вниз» (TOP-DOWN). Архітектура та Будівництво: Відновлення України. Наука, Технологія, Практика: програма та тези II Міжнар. наук.-техн. форуму. *Особисто автором зібрано і проаналізував технічні характеристики низки об'єктів реалізованих за технологією TOP-DOWN. Виконав кількісний порівняльний аналіз геометричних характеристик та вартості робіт.*

7. Дослідження факторів, що впливають на технологію влаштування армовидавлювальних конструкцій. Буд Майстер Клас 2024: програма та тези Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених. *Особисто автором проведено експертне опитування серед 12 фахівців для ранжування ключових технологічних чинників. Виявлено критичні фактори впливу, що впливають на техніко-економічні показники технології гравітаційного видавлювання.*

8. Сучасні ковзні опалубні системи. Архітектура, Дизайн та Будівництво: Інноваційні технології: програма та тези I Міжнар. наук.-техн. форуму. *Особисто автором розроблено багаторівневу класифікацію ковзних*

опалубних систем за трьома основними ознаками: формоутворювальні елементи, опорна частина та механізм переміщення. Вперше систематизовано 12 ознак класифікації, зокрема напрямок переміщення, тип домкратів, тип формоутворюваної поверхні, спосіб кріплення до основної конструкції тощо.

9. Дослідження монтажно́ї ваги армовидавлювальної стінової конструкції. Архітектура, Будівництво, Дизайн: Технологія, Енергетика, Менеджмент: програма та тези I Міжнар. наук.-техн. форуму. *Особисто автором проведено комплексний техніко-аналітичний розрахунок монтажно́ї ваги стінових конструкцій, що зводяться методом гравітаційного видавлювання, з урахуванням геометричних параметрів (довжина, товщина, висота) та фізико-механічних властивостей заповнювального середовища.*

LIST OF PUBLICATIONS ON THE DISSERTATION TOPIC

Articles in domestic professional publications (all publications are indexed in international databases)

1. Makhynia, O. M., & Halenko, Y. O. (2023). Pile-columns in high-rise building construction using the top-down method. *Ways to Enhance Construction Efficiency under Market Relations: Collection of Scientific Papers*, 51(1), 78–92. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51\(1\).259-270](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.51(1).259-270). The author personally carried out an analytical generalization of the geometric and structural parameters of pile columns when implementing the “top-down” technology and substantiated their role in the stability of the process.

2. Halenko, Y. O., & Makhynia, O. M. (2023). Classification of sliding formwork systems. *Ways to Enhance Construction Efficiency under Market Relations: Collection of Scientific Papers*, 52(1), 157–170. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52\(1\).157-170](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52(1).157-170). The author personally systematized existing types of sliding formwork and developed classification criteria for their differentiation in the context of modern construction.

3. Makhynia, O. M., & Halenko, Y. O. (2024). Theoretical investigation of the mounting weight of gravity-extrusion structures. *Bases and Foundations*, 49, 77–85. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.49.2024.77-85>. The author personally calculated the installation weight, taking into account changes in geometric parameters and design solutions, and proposed a generalized formula for engineering assessment.

4. Halenko, Y. O., & Makhynia, O. M. (2025). Investigation of factors affecting the gravity-extrusion construction of underground structures. *Tavriyskyi Scientific Bulletin: Technical Sciences*, (1), 540–550. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.1>. The author personally performed an expert assessment of influential factors, ranked them by significance, and formed a basis for building a model of the extrusion process.

Scientific works confirming the testing of dissertation materials: conference abstracts

5. Analysis of the current state of the top-down method in high-rise building construction. In *Architecture and Construction: New Trends and Technologies. Theory and Practice* [Program and abstracts of the I Int. Sci.-Tech. Forum]. *The author personally conducted a systematic review and synthesis of existing publications and technical reports on the application of TOP-DOWN in high-rise construction. A comparative analysis of the advantages and limitations of various implementations of the technology was performed using well-known projects as examples.*

6. Analysis of parameters of buildings constructed by the top-down method. In *Architecture and Construction: Reconstruction of Ukraine. Science, Technology, Practice* [Program and abstracts of the II Int. Sci.-Tech. Forum]. *The author personally collected and analyzed the technical characteristics of a number of objects implemented using TOP-DOWN technology. Performed a quantitative comparative analysis of geometric characteristics and cost of work.*

7. Investigation of factors influencing the installation of gravity-extrusion structures. In *Build Master Class 2024: Program and abstracts of the Int. Sci.-Practical Conference for Young Scientists*. The author personally conducted an expert survey among 12 specialists to rank key technological factors. Critical factors influencing the technical and economic indicators of gravity extrusion technology were identified.

8. Modern sliding formwork systems. In *Architecture, Design and Construction: Innovative Technologies* [Program and abstracts of the I Int. Sci.-Tech. Forum]. The author has developed a multi-level classification of sliding formwork systems based on three main characteristics: form-forming elements, support part, and movement mechanism. For the first time, 12 classification criteria have been systematized, including the direction of movement, type of jacks, type of formwork surface, method of attachment to the main structure, etc.

9. Investigation of the mounting weight of gravity-extrusion wall structures. In *Architecture, Construction, Design: Technology, Energy, Management* [Program and abstracts of the I Int. Sci.-Tech. Forum]. The author personally performed a comprehensive technical and analytical calculation of the installation weight of wall structures erected using the gravity extrusion method, taking into account geometric parameters (length, thickness, height) and the physical and mechanical properties of the filling medium.

ЗМІСТ

ВСТУП	22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВЕДЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТІНОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ГЛИБОКОГО ЗАКЛАДАННЯ	
1.1 Аналіз відомих технологій зведення підземних вертикальних стінових конструкцій глибокого закладання	27
1.2 Проблемні питання технології зведення підземних вертикальних стінових конструкцій та пошук варіантів їх вирішення.....	42
1.3 Аналіз технологій влаштування монолітних стін в ковзних опалубних системах	49
1.4 Постановка завдань дослідження	53
Висновки до першого розділу	62
РОЗДІЛ 2. ВИЯВЛЕННЯ, ВІДБІР ТА СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ТА ТРУДОМІСТКІСТЬ ПРОЦЕСУ ВЛАШТУВАННЯ СТІН В ҐРУНТІ	
2.1 Методика і методи дослідження	64
2.2 Виявлення факторів, що впливають на влаштування стін в ґрунті.....	66
2.3 Відбір та систематизація факторів	93
2.4 Моделювання процесу влаштування стін в ґрунті за методом гравітаційного формування.....	100
Висновки до другого розділу	102
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТРУДОМІСТКОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ВЛАШТУВАННЯ СТІН ЗА МЕТОДОМ ГРАВІТАЦІЙНОГО ФОРМУВАННЯ	
3.1 Дослідження тривалості та продуктивності виготовлення вертикальних стінових конструкцій методом гравітаційного видавлювання	104
3.2 Дослідження трудомісткості та оцінка собівартості виготовлення стінових конструкцій методом гравітаційного видавлювання	127

3.3 Дослідження монтажно́ї ваги підземних стінових конструкцій, які виготовляються методом гравітаційного видавлювання.....	136
3.4 Дослідження меж можливостей застосування технології гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій підземних споруд.....	151
Висновки до третього розділу	152
РОЗДІЛ 4. ТЕХНОЛОГІЯ ГРАВІТАЦІЙНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПІДЗЕМНИХ СТІНОВИХ АРМОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ	
4.1 Методика проєктування технології гравітаційного видавлювання підземних стінових армобетонних споруд	155
4.2 Рекомендації до технології виготовлення конструкцій методом гравітаційного видавлювання	166
Висновки до четвертого розділу	170
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	171
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	174

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Робота присвячена вирішенню проблемного питання з поліпшення якості підземних стінових конструкцій та підвищенню ефективності їх зведення з рівня поверхні ґрунту за рахунок застосування методу гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій.

Упродовж останнього десятиліття спостерігається значний прогрес у розвитку засобів зведення підземних споруд, що пов'язано з впровадженням автоматизованих систем керування, використанням удосконалених типів арматури й інноваційних бетонних сумішей. Однак, навіть за умов активної механізації, залишаються невирішеними проблеми, пов'язані з високою трудомісткістю і складністю виконання операцій зі зведення монолітних конструкцій в обмежених умовах будівельних майданчиків. На сучасному етапі розвитку будівельного виробництва для зведення підземних конструкцій за таких умов широко застосовують метод «стіна в ґрунті», що дозволяє зводити підземні споруди та фундаменти без влаштування котловану з рівня землі. Метод «стіна в ґрунті» використовують у сучасних методах зведення будинків, наприклад «зверху-вниз». Підземні конструкції, що зводяться за допомогою методу «стіна в ґрунті» можуть бути монолітні, збірні чи збірно-монолітні. Досвід застосування методу «стіна в ґрунті» виявив, що при влаштуванні монолітних конструкцій досить складно гарантувати якість отриманої конструкції внаслідок перемішування бетонної суміші з глинистим розчином, зменшення зчеплення арматури з бетоном за рахунок налипання глини на арматуру тощо. При застосуванні збірних конструкцій виникає значна кількість стиків між збірними елементами за рахунок обмеження розмірів збірних елементів транспортним габаритом, що, зі свого боку, зменшує надійність влаштованих конструкцій, особливо за наявності напірних підземних вод. Застосування збірно-монолітних конструкцій значно збільшує собівартість виконання робіт. Вирішення цієї проблеми можливе за рахунок

застосування технології зведення підземних конструкцій методом гравітаційного видавлювання.

Технологія зведення підземних конструкцій методом гравітаційного видавлювання базується на принципах зведення конструкцій методом «стіна в ґрунті» і зведення конструкцій у ковзній опалубці. Це дозволяє виготовляти підземну конструкцію на рівні землі з контролем її якості та поступовим опусканням готової конструкції до попередньо влаштованої траншеї, яка стабілізована глинистим розчином. Результатом цього є можливість отримати конструкцію з високою якістю поверхні та мінімальною кількістю стиків, що, зі свого боку, підвищує надійність підземної споруди.

Зазначеною проблематикою займалися такі вітчизняні та іноземні вчені: Абизов А. Г., Болотов В. П., Большаков Ю. В., Cathro D., Ганічев І. А., Галінський А. М., Griffiths D., Зубков В. М., Клімов В. І., Козлюк Е. І., Махиня О. М., Менеїлюк О. І., Мещеряков А. Н., Перлей Е. М., Першин В. Г., Писанко Н. В., Федоров Б. С., Філахтов О. Л., Хейфец В. Б., Шейнблум В. М., Янчук М. Г., Чернухин А. М.. До вивчення та вдосконалення ковзної опалубки долучилися такі науковці: Amer M., Baciu S., Bao D. W., Беляков Ю. І., Diaconu R., Güvel Ş. T., Літвінов О. О., Li W., Lin X., Oberlender G. D., Paul D., Peurifoy R. L., Sharifi M. R., Тонкачєєв Г. М., Тонкачєєв В. Г., Xie Y. M., Шарапа С.П., Zayed T..

Актуальність теми дослідження. Зростання масштабів підземного будівництва в умовах урбанізації та обмеженості міського простору висуває нові вимоги до швидкості, якості та економічної доцільності зведення монолітних конструкцій. Метод гравітаційного видавлювання забезпечує можливість безперервного формування армобетонних стінових елементів безпосередньо на рівні поверхні ґрунту з подальшим опусканням у траншею під власною вагою, що знижує кількість стиків, забезпечує контроль якості бетону та скорочує загальні витрати.

Предмет дослідження. Технологічний процес влаштування підземних армобетонних стін методом гравітаційного видавлювання. Метою роботи є

пошук і обґрунтування оптимальних параметрів цього процесу, які забезпечують мінімальну трудомісткість, високу продуктивність та економічну ефективність зведення конструкцій.

Об'єкт дослідження. Технологія гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій підземних споруд.

Мета дослідження. Розроблення науково обґрунтованих основ технології зведення підземних армобетонних конструкцій методом гравітаційного видавлювання.

Завдання дослідження. Для досягнення мети були поставлені такі основні завдання:

- провести аналіз існуючих методів зведення підземних стінових конструкцій, зокрема технології «стіна в ґрунті» та методів збірно-монолітного будівництва;
- виявити ключові фактори, що впливають на трудомісткість, продуктивність та собівартість процесу гравітаційного видавлювання;
- обґрунтувати методику проєктування технологічного режиму гравітаційного видавлювання;
- надати практичні рекомендації щодо впровадження технології у будівельну практику.

Методи дослідження. У процесі дослідження технології гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій підземних споруд використано комплексний підхід, що включає такі методи:

- методи системно-структурного аналізу та порівняння технологій зведення підземних конструкцій, влаштування монолітних армобетонних конструкцій і технологічного процесу гравітаційного видавлювання армобетонних підземних конструкцій;
- методи розстановки пріоритетів у дослідження факторів впливу на технологію гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій підземних споруд;

- методи абстрагування конструктивних рішень модуль-форм опалубної системи та технологічних операцій влаштування армобетонних конструкцій методом гравітаційного видавлювання;
- методи математичного і організаційно-технологічного моделювання процесу влаштування підземних армобетонних конструкцій методом гравітаційного видавлювання;
- методи формалізації та статистичного аналізу, які використовувались для обробки отриманих результатів.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

- обґрунтовано конструктивні параметри армобетонних стін у ґрунті та технологічні параметри процесу гравітаційного видавлювання (геометричні розміри, монтажна вага, часові інтервали набору міцності);
- розроблено й формалізовано методику проєктування процесу гравітаційного видавлювання з урахуванням ключових факторів впливу.

Удосконалено:

- конструктивно-технологічне рішення модульної опалубки для забезпечення герметичності, жорсткості та зручності монтажу-демонтажу.

Отримала подальший розвиток:

- теоретичні основи будівельних процесів у частині безперервного формаційного видавлювання армобетонних елементів.

Особистий внесок здобувача полягає у виявленні теоретичних залежностей техніко економічних параметрів технології гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій підземних споруд від параметрів конструкції траншеї, параметрів бетонної суміші та характеристик глинистого розчину.

Практичне значення полягає в розробці технічного завдання на проєктування опалубної модуль-форми, у складанні технологічних карт для

будівельних організацій, в обґрунтуванні контролю якості бетону до опускання стінових конструкцій та в доведенні економічної ефективності.

Апробації матеріалів дисертації. Результати дисертаційної роботи оприлюднені та одержали схвалення на: міжнародному науково-технічному форумі «Архітектура та Будівництво: нові тенденції і технології. Теорія і практика» (26—27 жовтня 2021 р., м. Київ); міжнародному науково-технічному форумі «Архітектура та Будівництво: Відновлення України. Наука, Технологія, Практика» (17—18 листопада 2022 р., м. Київ); міжнародному науково-технічному форумі «Архітектура, Дизайн та Будівництво: Інноваційні технології» (15—16 листопада 2023 р., м. Київ); міжнародному науково-технічному форумі «Архітектура, Будівництво, Дизайн: Технологія, Енергетика, Менеджмент» (16—17 жовтня 2024 р., м. Київ); міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Буд Майстер Клас 2024» (5—7 листопада 2024 р., м. Київ).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного з розділів та загальних висновків, списку використаних джерел зі 109 найменувань. У дисертації розміщено 10 таблиць і 41 рисунок. Повний обсяг дисертації — 186 сторінок. Основна частина в складі чотирьох розділів і загальних висновків містить 147 сторінки, список використаних джерел — 13 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВЕДЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТІНОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ГЛИБОКОГО ЗАКЛАДАННЯ

1.1 Аналіз відомих технологій зведення підземних вертикальних стінових конструкцій глибокого закладання

Класифікація зведення вертикальних стінових підземних конструкцій глибокого закладання. Підземні споруди великої глибини з вертикальними стінками зводять за допомогою спеціальних технологій, які різняться конструктивним рішенням і способом виконання робіт. Загалом їх можна поділити на кілька основних типів [1-5]. До них належать: глибокі бурові опори великого діаметра (бурунабивні палі-колони), тонкостінні збірні оболонки (оболонки-опори), опускні колодязі (відкритий кесонний метод без стисненого повітря), кесони (із застосуванням стисненого повітря), огорожувальні конструкції типу «стіна в ґрунті» (протифільтраційні стіни в ґрунті). Окремо виділяють також комбіновані системи, що поєднують кілька із зазначених елементів (наприклад, палі-колони з монолітними дисками перекриттів) або різні послідовності виконання робіт (традиційний «знизу-вверх» чи метод «зверху-вниз» або «вгору-вниз»). Класифікація може проводитись і за іншими ознаками: матеріалом (монолітні залізобетонні або збірні елементи, металеві оболонки тощо), умовами виконання (відкритим способом або під захистом глинистого розчину чи стисненого повітря) та формою конструкції (стрижневі опори або суцільні стінові діафрагми). На рисунку 1.1 зображена класифікація методів зведення глибокозакладених вертикальних підземних конструкцій, яка була створена на основі вище зазначених технологій.

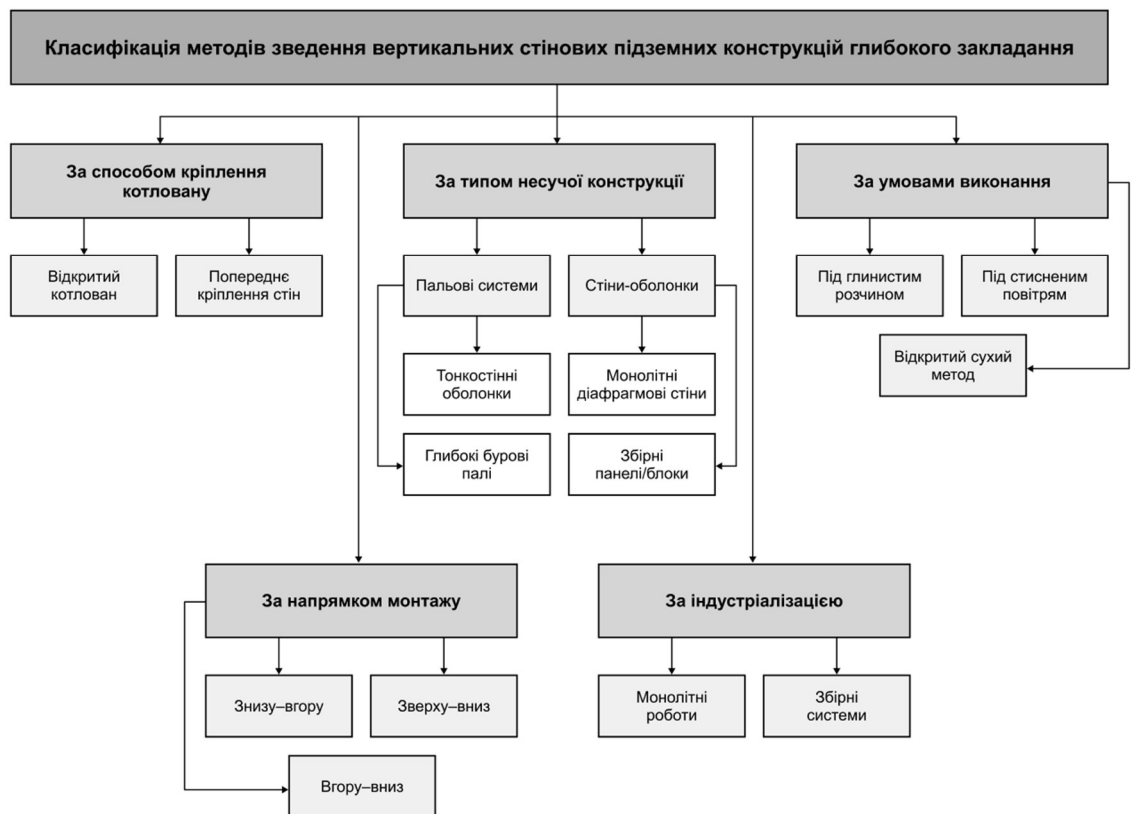


Рисунок 1.1 — Класифікація методів зведення глибокозакладених вертикальних підземних конструкцій

Технологія влаштування глибоких бурових опор. Глибокі бурові опори — це різновид буронабивних паль збільшених розмірів, що формуються шляхом буріння свердловини з подальшим бетонуванням палі. На відміну від звичайних паль, бурові опори мають значно більший діаметр (поширені значення: 1,6 м, 2,0 м, 3,0 м) і можуть досягати глибини занурення до приблизно 60 м [6]. Для підвищення несучої здатності часто виконують розширення нижньої частини свердловини (так звану «підшву-щит» або колодязне розширення) до діаметра від приблизно 2,5 м до 5 м [7].

Буріння таких свердловин здійснюється спеціальними потужними установками роторного типу; всі роботи ведуться під захистом глинистого розчину (бентонітової суспензії) для запобігання обвалення стінок й обводнення [8]. Застосування глибоких бурових паль можливе практично в

будь-яких ґрунтах, окрім скельних масивів чи ґрунтів з великими валунами, де буріння та розширення ускладнене або неможливе [9]. Після досягнення проєктної глибини в свердловину опускають армокаркас і виконують бетонування (зазвичай методом вертикально-часткового бетонування). Завдяки великим розмірам одна така опора здатна сприймати значні навантаження; їх величина залежить від ґрунтових умов і діаметра палі. Однак висока несуча здатність супроводжується відносно низькою продуктивністю: спорудження однієї бурової опори великого діаметра потребує значного часу (буріння десятків метрів породи, встановлення арматури, бетонування та витримка бетону). Технологія вимагає застосування висококваліфікованого персоналу та спеціалізованої техніки: бурових станків великої потужності, інвентарних обсадних труб, бурових доліт-розширювачів тощо. Загалом метод глибоких бурових паль забезпечує надійні фундаменти для споруд великого навантаження, хоча його застосування обмежене випадками, коли відкритий котлован неможливий або недоцільний з техніко-економічних міркувань.

Буросічна пальова стіна. Для утримання стін глибокого котловану в умовах щільної міської забудови часто використовують технологію бурових паль, що пересікаються. Буросічні палі — це серія свердловин, які заповнюються бетоном так, що кожна наступна свердловина пересікає (заходить в перетин) попередню, утворюючи суцільну стінку [10]. Зазвичай реалізується така схема: спочатку бурять первинні палі з більшим кроком (їх бетонують без значного армування або зі слабким армуванням), а потім між ними бурять вторинні палі, які перекривають край сусідніх первинних. Вторинні палі армуються (каркасами або двотаврами) й утворюють несучу частину стіни, а бетон первинних заповнює проміжки, забезпечуючи суцільність стінки. Таким чином утворюється огороження котловану без проміжків (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 — Буросічна пальова стіна

Переваги буросічних пальових стін. Порівняно із забивними шпунтовими палями, бурові пальові огорожі забезпечують значно більшу жорсткість конструкції. Бетонна стіна товщиною, наприклад, від 600 мм до 800 мм (типовий діаметр паль) працює як монолітна діафрагма, тому горизонтальні переміщення ґрунту мінімальні — це захищає сусідні будівлі від просідань [11]. Інша перевага — гнучкість у плані. Палі можна розташувати за криволінійною траєкторією чи складним контуром, адаптуючись до умов стислого простору. Там, де стіна в ґрунті потребує переважно прямокутного контуру через свою конструкцію, буросічні палі легше «огинають» форми. До того ж технологія допускає виконання робіт в умовах обмеженої висоти: за потреби можна використовувати нарощувані шнеки та низькопрофільну бурову установку, тоді як для стандартної стіни в ґрунті потрібна висота під грейфер.

Буросічна пальова стіна забезпечує досить герметичну огорожу котловану. Перетин паль створює перекриття, яке значно зменшує приплив ґрунтових вод (хоча повністю водонепроникним його не вважають через можливі мікротріщини). Порівняно зі шпунтом, водонепроникність таких конструкцій набагато краща. На відміну від інших технологій, буросічні пальові стіни можуть проходити крізь об'єкти з помірною міцністю (наприклад, старі фундаменти, невеликі валуни). Глибина пальової огорожі обмежується можливостями бурової установки. Нині доступні установки, що бурять палі діаметром 1 м на глибину від 20 м до 30 м, а при використанні штангових бурових або обсадних труб можна досягати глибини від 40 м до 50 м. [12] Таким чином буросічні палі закривають діапазон глибин типових міських підвальних приміщень (до 20 м) і можуть частково конкурувати зі «стіною в ґрунті» на середніх глибинах.

Обмеження і недоліки. Основний виклик при влаштуванні буросічних пальових стін — це точність буріння. Палі повинні пересікатися одна в одну з мінімальним зміщенням. На практиці при глибокому бурінні важко забезпечити абсолютно вертикальну траєкторію: навіть відхилення від 1 % до 2 % по глибині 20 м призведуть до розходження в десятки сантиметрів. Тому для дуже глибоких огорож (від 20 м до 30 м) гарантувати повне перекриття складно [13]. Через особливість технології існують ризик утворення мікротріщин, що може вплинути на водонепроникність конструкції. Вода може проникати через невеликі ділянки, де палі перекрилися не ідеально. Виконання великої кількості бурових паль (часто з малим кроком від 0.5 м до 0.8 м між осями) є матеріало- та трудомістким. Вартість буросічної стіни, як правило, вища за вартість шпунтового огороження аналогічної довжини [14]. Крім того, палі не утворюють гладкої внутрішньої поверхні: стіна виходить «зубчастою», що ускладнює улаштування гідроізоляції підвалу та прилягання конструкцій [15]. Частково цю проблему вирішують додатковим торкретуванням або влаштуванням тонкої стінки по внутрішньому контуру.

Сфери застосування. Буросічні пальові огорожі широко використовуються для глибоких котлованів під будівлі й інженерні споруди в місті, коли забивний шпунт непридатний (дуже тверді ґрунти або неприпустимі вібрації). Вони добре зарекомендували себе при будівництві багаторівневих паркінгів, підземних торгових центрів у центрі міст. Часто їх комбінують з методом top-down, використовуючи як постійну огорожувальну конструкцію підвалу. Такі буросічні палі іноді застосовують для берегоукріплення на набережних, якщо потрібна стінка, міцніша за шпунт, а «стіну в ґрунті» робити дорого [16].

Технологія влаштування глибоких опор із тонкостінних залізобетонних оболонок. Опори зі збірних тонкостінних оболонок — це великодіаметральні стрижневі фундаменти, що влаштовуються шляхом занурення в ґрунт пустотілих залізобетонних або сталевих оболонок з подальшим заповненням їх бетоном. Оболонки виготовляються заздалегідь секціями довжиною до 12 м і діаметром до 4,5 м [17]. На будівельному майданчику секції послідовно з'єднують між собою (болтовими стиками або зварюванням закладних деталей) і занурюють у ґрунт до розрахункової глибини. Заглиблення може виконуватися кількома способами: загвинчуванням (оболонка оснащується сталевим різальним наконечником і гвинтовими лопатями на нижній секції), вібрацією (використання гідровіброзанурювачів великої потужності) або статичним вдавлюванням секцій за допомогою домкратів. Наприклад, при загвинчуванні оболонки використовується спеціальний механізм — кабестан, який обертає оболонку з частотою приблизно 0,5 об/хв, розвиваючи крутний момент до 1000 кН·м [18]. Для стійкості установки кабестан анкерами кріплять до землі або вже до забетонованих сусідніх паль. Метод віброзанурення передбачає оснащення оболонки вібратором великої маси. При вдавлюванні застосовується пресове обладнання, здатне генерувати зусилля, достатні для переміщення секції вниз [19].

Перевагою фундаментів-оболонки є високий рівень індустріалізації виготовлення (заводське виготовлення секцій) та можливість механізувати процес занурення. У багатьох випадках такі опори можуть слугувати заміною опускних колодязів або кесонів, оскільки здатні занурюватись на подібні глибини за меншої трудомісткості процесу [20]. До окремих недоліків належить дещо менша несуча здатність одиночної оболонки порівняно з монолітним стовпом того ж діаметра (через пустотілість та тонкі стінки). Однак це компенсується можливістю об'єднання декількох оболонок в куці з загальним ростверком [21]. Метод ефективний переважно у відносно м'яких ґрунтах (піски, супіски, суглинки), де опір ґрунту дозволяє заглибити оболонку вібрацією чи загвинчуванням. У щільних та особливо скельних породах застосування оболонок обмежене. Типові глибини занурення можуть досягати кількох десятків метрів (як правило, від 30 м до 40 м), залежно від ґрунтових умов і використовуваного обладнання. Після досягнення потрібної глибини порожнину оболонки, як правило, повністю заповнюють бетонною сумішшю, утворюючи таким чином суцільну вертикальну фундаментну колону.

Технологія зведення фундаментів і підземних споруд методом опускного колодязя. Опускний колодязь — це стінова підземна споруда (шахтного типу), яку зводять шляхом поступового заглиблення відкритої зверху вертикальної камери за рахунок власної ваги конструкції та виїмки ґрунту зсередини. По периметру нижньої частини такого колодязя влаштовується різальний ніж, що полегшує проникнення вниз. Технологічний процес виглядає так: на поверхні споруджується стінова конструкція колодязя (кільце або короб із залізобетону) необхідної товщини і міцності, після чого під її ріжучою гранню вибирається ґрунт. Під дією ваги вся споруда поступово опускається вниз. У міру просідання зверху нарощують нові блоки стін, і процес повторюється до досягнення проектною глибини. Стінки опускного колодязя можуть бути монолітними (литими на місці) або збірними. Залізобетонні стіни розрізняють за товщиною: тонкостінні (до приблизно 0,5

м), середньої масивності (від 0,5 м до 1,2 м) та масивні (понад 1,2 м) [22]. Вибір залежить від діаметра споруди та навантажень.

Монолітні колодязі традиційно виконувалися безпосередньо на будівельному майданчику, що потребує великої витрати матеріалів і трудових ресурсів. Це є істотним недоліком класичного способу, тому в сучасній практиці все більшого поширення набувають збірні опускні колодязі з полегшених елементів. Застосовуються, зокрема, порожнисті залізобетонні блоки криволінійної або прямокутної форми, типові залізобетонні плити-шахти тощо. З їх допомогою формують стінки колодязя, стикуючи елементи при опусканні. Такі збірні конструкції значно знижують матеріалоемність і трудомісткість робіт. Впроваджені проекти опускних колодязів із крупноформатних збірних панелей дозволяють влаштовувати шахти діаметром до 60 м і глибиною занурення до приблизно 20 м [23]. Подібні великогабаритні колодязі, зібрані з плоских залізобетонних панелей на всю висоту споруди, використовувались при будівництві об'єктів середніх розмірів.

Оскільки власна вага полегшених збірних конструкцій може бути недостатньою для заглиблення, при їх опусканні часто застосовують технологію «тиксотропної сорочки» — заповнення зазору між стінками колодязя і ґрунтом бентонітовим розчином. Така суспензія виконує дві функції: стабілізує ґрунт навколо, запобігаючи його обваленню, та зменшує тертя між ґрунтом і стінами, діючи як мастило при опусканні споруди. Завдяки цьому навіть відносно легкі колодязі великого діаметра можна занурити на значну глибину без перекосів.

Опускний колодязь має технологічні обмеження: при дуже потужному припливі ґрунтових вод і пливунах відкритий метод стає складним або неможливим. У таких випадках переходять до кесонного (закритого) способу. Як правило, опускні колодязі ефективні до глибин приблизно від 20 м до 30 м. За більшого заглиблення різко зростають труднощі водопониження та ризики втрати стійкості стін [24]. Для безпечного виконання робіт необхідно також стежити за осіданням ґрунту довкола. У щільній міській забудові існує

небезпека випору або винесення ґрунту з-під сусідніх фундаментів при опусканні колодязя, тому технологію слід застосовувати з обережністю. Після досягнення проєктної глибини дно колодязя (ножова частина) герметизують, а внутрішню порожнину за потреби використовують як шахту або фундаментну камеру. Нерідко потім її заповнюють бетоном для створення суцільного підземного масиву.

Технологія заглиблення кесонів. Кесонний метод — це різновид опускного методу, при якому для заглиблення конструкції використовується стиснене повітря. Кесон являє собою перевернутий догори дном ящик (камера) із жорсткими стінками та відкритим низом, оснащений ріжучим ножом по периметру [25]. Перед початком робіт кесонну камеру накривають перекриттям з отвором шахти та встановлюють герметичний шлюз. Далі в камеру подають під тиском повітря до рівня, що перевищує гідростатичний тиск ґрунтових вод на глибині ножа. Стиснене повітря витісняє воду з робочої камери, забезпечуючи сухий простір для виїмки ґрунту вручну або механізовано. Через шлюзовий апарат робітники, обладнання та ґрунт потрапляють в кесон або з кесона без втрати тиску. Поступово вибираючи ґрунт і підриваючи ножом основу, досягають осадки кесона під власною вагою (іноді для збільшення ваги верх кесона обтяжують бетонним баластом). Ця технологія значно складніша й дорожча за звичайний опускний колодязь, проте дозволяє заглиблювати споруду в дуже складних умовах: при сильному напорі води, пливунних ґрунтах, а також за наявності значних твердих включень, які неможливо розробити у відкритому котловані.

Кесони використовуються набагато рідше, ніж інші види фундаментів глибокого закладання, через їхню високу вартість та небезпеку робіт. Продуктивність занурення теж невисока — процес вимагає постійного контролю тиску (щоб запобігти аваріям при раптовому виході повітря) та обмеженого часу роботи людей під підвищеним тиском (через ризик кесонної хвороби). З міркувань безпеки глибина застосування кесонів зазвичай не перевищує приблизно 30 м, що відповідає тиску повітря

приблизно 0,3 МПа [26]. Для великих глибин технологія стає непридатною через неприпустимі умови для персоналу. Втім, за потреби, можлива автоматизація (гідромонітори, механічна виїмка ґрунту) або використання кесонів без присутності робітників (наприклад, кесон-колокол з дистанційною розробкою ґрунту). Конструктивно кесонна камера найчастіше виготовляється з монолітного або збірного залізобетону, висотою не менше 2,2 м, щоб забезпечити достатньо простору для роботи. Після досягнення проєктної позначки опускання кесона його порожнину (кесонну камеру) зазвичай заповнюють бетонною сумішшю, перетворюючи її на підземний фундаментний елемент. Таким чином, кесонні фундаменти виконують роль широкої основи (підшви) споруди, зануреної на необхідну глибину. Сфера застосування кесонів — переважно мости, гідротехнічні споруди, глибокі шлюзні камери, а також випадки міського будівництва біля існуючих будівель, де відкритий котлован неприпустимий через небезпеку просідання ґрунтів.

Технологія зведення фундаментів і підземних споруд методом «стіна в ґрунті». Метод «стіна в ґрунті» полягає у влаштуванні монолітних або збірних стін підземної споруди безпосередньо в ґрунті до початку виїмки котловану. Тобто несучі стіни майбутнього підземного об'єкта будуються у вузьких глибоких траншеях, стійкість яких підтримується спеціальним розчином [27]. Як розчин використовують бентонітову глинисту суспензію — вона заповнює траншею в процесі виїмки ґрунту грейферними або фрезерними механізмами і створює гідростатичний тиск на стінки, запобігаючи їх обваленню [28]. Одночасно бентоніт, проникаючи в пори ґрунту, утворює тонку «фільтраційну кірку» на стінках траншеї, що додатково ущільнює ґрунт і мінімізує втрати розчину [29]. Таким чином, правильно підібрана тиксотропна суспензія виконує роль тимчасової опалубки та кріплення ґрунту. Після завершення розробки траншеї в неї опускають арматурний каркас і проводять заповнення порожнини бетоном: або безпосереднім бетонуванням (монолітна стіна), або шляхом монтажу готових залізобетонних панелей з наступним ін'єкційним замонолічуванням стиків (збірна стіна) [30].

У результаті у ґрунті формується суцільна підземна стіна заданої товщини, що виконує функцію несучої та/або огорожувальної конструкції. Типова товщина монолітних діафрагмових стін становить приблизно від 0,6 м до 0,8 м, тоді як збірні тонкостінні панелі можуть мати товщину від 0,25 м до 0,40 м [31]. Їхня мала товщина компенсується ребрами жорсткості, коробчастим профілем і високою якістю заводського виготовлення.

Глибина занурення «стін в ґрунті» залежить від призначення споруди та ґрунтових умов. У цивільному та промисловому будівництві цей метод застосовується для фундаментів і підземних поверхів глибиною зазвичай приблизно від 25 м до 30 м [32]. Зокрема, для підземних паркінгів, технічних підпірних стін, станцій метро мілкового закладення тощо глибина траншей сягає від 20 м до 30 м за товщини стін від 0,6 м до 1,0 м. В гідротехнічному будівництві (протифільтраційні завіси гребель, берегові споруди) стіни в ґрунті можуть заглиблюватись і більше до водонепроникного шару чи скелі. Слід зазначити, що метод потребує спеціалізованої техніки: для риття траншей використовуються грейфери-екскаватори з подовженими штангами, гідрофрези, інколи бурові агрегати зі шнековими головками. Устаткування має забезпечувати задану вертикальність стін (допустиме відхилення — не більше 1:200). Довжина однієї захватки (траншеї) становить зазвичай від 2,5 м до 6 м. Готуючи довгу стіну, траншею розбивають на секції з проміжними «замками», щоб сусідні ділянки не обрушувалися (рисунок 1.3).

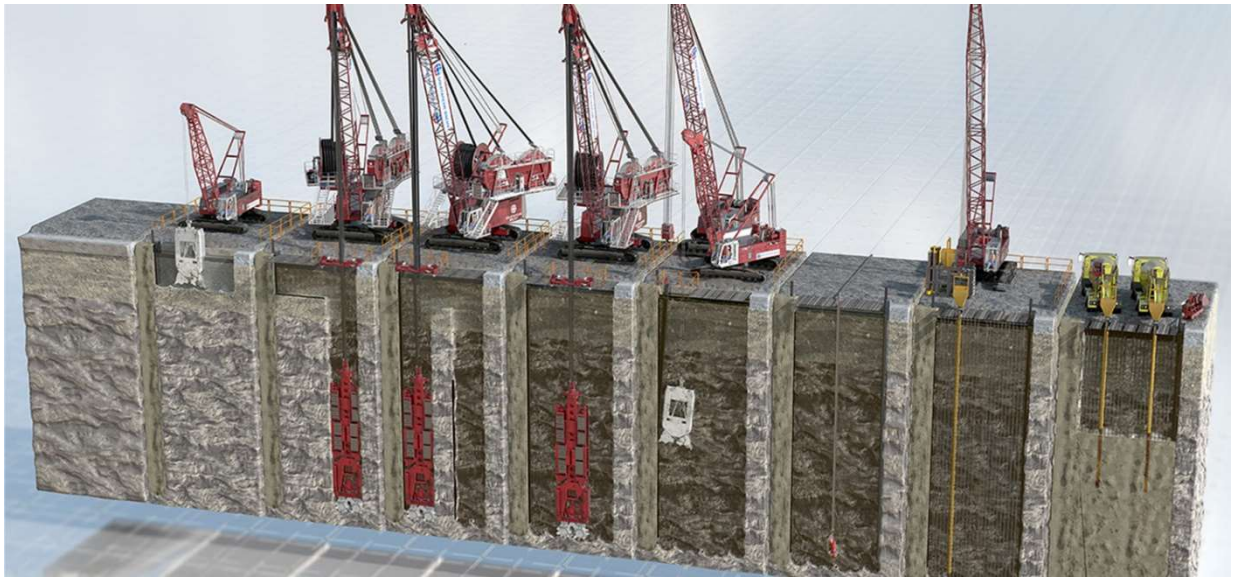


Рисунок 1.3 — Влаштування стіни в ґрунті [33]

Метод «стіна в ґрунті» найбільш ефективний у зв'язних або щільних піщаних ґрунтах, де суспензія добре тримає стінки. У слабкопроникних глинах іноді замість бентонітового розчину достатньо заповнення траншеї звичайною водою (колоїдна глина ґрунту сама виконує роль ущільнювача). Натомість у дуже сипучих гравелистих ґрунтах та карстових пустотах ця технологія потребує додаткових заходів (ущільнення ґрунту, заморожування або попереднє водопониження), інакше зростає витрата суспензії та ризик обвалень [34]. Виготовлені в ґрунті стіни мають високу несучу здатність і водонепроникність, тому метод широко застосовується. Він поєднує функцію кріплення котловану та, власне, конструкції фундаменту або стіни підвалу. Наприклад, під час будівництва підземних поверхів будівель за технологією top-down діафрагмові стіни в ґрунті виконують роль постійних огорожувальних конструкцій котловану й одночасно зовнішніх стін підземної частини споруди [35].

Технологія зведення підземних споруд методом «вверх-вниз» і «зверху-вниз». Сучасні методи організації будівництва дозволяють вести спорудження підземної частини об'єкта паралельно з наземною, що суттєво скорочує загальні строки виконання робіт [36]. Йдеться про так званий метод «top-down» («зверху-вниз») та його варіації. При традиційному методі «знизу-вверх» підземні рівні споруди зводяться після повного виймання ґрунту котловану: спочатку монтується фундамент (нижній рівень), потім — перекриття підвалу, а далі монтуються наступні поверхи вгору. Такий послідовний процес вимагає відкритого котловану на всю глибину, що може бути проблематично в щільній міській забудові (через вплив на сусідні будинки, потребу в просторі під розкоси чи відкоси). Натомість при методі «зверху-вниз» початково влаштовуються огорожувальні конструкції котловану (наприклад, стіна в ґрунті або щільний ряд паль) і вертикальні опори (бурові палі-колони або кесонні колони), після чого будівництво підземної частини ведеться від поверхні вниз. На першому етапі над майбутнім котлованом споруджується перекриття нульового рівня (плита поверхні), залишаючи в ньому технологічні отвори для подальшого видалення ґрунту [37]. Ця плита спирається на попередньо влаштовані палі-колони та на огорожувальні стіни котловану та фактично виконує роль тимчасового перекриття та розпірки для утримання ґрунту по периметру. Далі через отвори здійснюється вибирання ґрунту під захистом вже змонтованого перекриття. Після виїмки ґрунту до рівня наступного підземного поверху виконують бетонування чергової плити перекриття, яка знову спирається на палі-колони [38].

Таким чином, конструкція «росте» одночасно вниз у підземну частину і вгору. Після завершення підземних рівнів будівельники можуть одразу над ними зводити наземні поверхи. На практиці спорудження верхніх наземних поверхів часто починають, коли паралельно ще ведеться виїмка ґрунту нижче. Таким чином цикл «верх-низ» і «низ-верх» накладаються один на одного. Метод «top-down» вимагає високої точності геодезичної прив'язки паль-колон

(адже вони служать колонами каркасу будівлі) та ретельної технологічної координації. Необхідно заздалегідь передбачити отвори в перекриттях для техніки, підсилити конструкції на етапі будівництва тощо. Водночас зведення може йти без відкритого котловану повної глибини, що підвищує безпеку в умовах щільної забудови, а перехресна організація робіт скорочує тривалість проєкту від 15 % до 30 % [39]. За даними досвіду, пальові колони, застосовані в технології «зверху-вниз», мають довжину приблизно від 16 м до 67 м (в середньому від 30 м до 35 м) і сприймають розрахункові навантаження від 1,5 МН до 44 МН. Крок між такими колонами може становити від 2 м до 4 м залежно від конструктивної схеми будівлі [40]. Нерідко використовуються комбіновані палі-колони зі сталевим сердечником (так звані king-post). Їхня перевага в тому, що сталева секція відразу сприймає навантаження від ростучої наземної частини будівлі, поки бетон нижньої частини ще набирає міцність [41].

Технологія «top-down» успішно застосовується в будівництві висотних будівель з глибокими підземними паркінгами в щільній міській забудові. Також цей метод відомий як «міланський метод» при будівництві метро [42]. Спочатку роблять перекриття тунелю на поверхні, відновлюють дорожній рух, а під ним продовжують рити тунель і облаштовувати станції. В Україні метод «top-down» поки що застосовувався обмежено. Серед успішних застосувань можна виділити проєкт з реконструкції Поштової площі (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 — Застосування технології «top-down» під час реконструкції
Поштової площі

Також виділяють так званий метод «вверх-вниз» — це різновид технології «top-down», але без одночасного зведення надземної частини. Його особливість у тому, що всі роботи відбуваються в рамках «нульового циклу», тобто спочатку споруджується підземна частина об'єкта до заданої відмітки, а вже потім над нею зводять надземні поверхи [43]. Іншими словами, технологія «вверх-вниз» не передбачає паралельного зведення верхніх поверхів під час риття котловану та влаштування підземних рівнів. Це може бути виправдано, якщо конструкція підвалів достатньо складна та потребує повної концентрації ресурсів, або якщо графік будівництва не вимагає максимального перекриття етапів. Відсутність одночасного монтажу наземної частини дещо спрощує організацію робіт під землею та може скоротити їхню тривалість [44]. Проте загальний час будівництва при цьому довший, ніж у схемі «зверху-вниз», адже

надземні поверхи починають будуватися пізніше. Вибір між «зверху-вниз», «вверх-вниз» чи традиційним підходом залежить від конкретних умов проєкту: глибини підземної частини, наявності підпірних стін, термінів й економічних обґрунтувань.

1.2 Проблемні питання технології зведення підземних вертикальних стінових конструкцій та пошук варіантів їх вирішення

Кожен з описаних методів має свої сфери ефективного використання, а також характерні обмеження, які слід враховувати при виборі технології будівництва. Нижче узагальнено основні проблемні аспекти діючих методів зведення глибоких підземних конструкцій.

- **Обмеження за ґрунтовими умовами.** Деякі технології непридатні в певних типах ґрунтів. Наприклад, бурові палі та опори-оболонки не можуть виконуватися у скельних породах чи при наявності великих валунів: бурове обладнання не здатне руйнувати монолітний камінь або оминати великі перешкоди. Метод «стіна в ґрунті» вимагає достатньої стабільності стінок траншеї: у гравелистих, обводнених ґрунтах важко забезпечити герметичність суспензійної сорочки, збільшується витрата бентоніту та ризик обвалень. Опускні колодязі погано працюють у пливунах і насичених пісках. При сильному напльві ґрунту відкритий колодязь просто «застрягає» або виникає небезпека випору основи. Граничною є ситуація, коли глибина опускання переходить нижче рівня ґрунтових вод за відсутності ефективного водопониження. У таких випадках доводиться переходити на кесонний метод зі стисненим повітрям, що ускладнює роботу та здорожчує проєкт.
- **Трудомісткість і продуктивність.** Деякі методи є матеріало- та трудомісткими, що знижує їх продуктивність. Монолітні опускні колодязі потребують великих обсягів бетонування безпосередньо на будівельному майданчику, значних затрат часу та ручної праці [45]. Кесони потребують

не тільки бетонних і земляних робіт, а й монтажу герметичного обладнання, постійної роботи компресорів і спеціального режиму праці людей — все це дуже уповільнює процес, тому кесонний метод застосовується рідко. Бурові палі великого діаметра теж не можуть виконуватися швидко: цикл однієї палі (буріння, встановлення каркасу, бетонування та пауза на твердість бетону) займає декілька діб, тому поля з десятків таких палей потребують місяців роботи важкої техніки. Низька швидкість виконання властива і методу «стіна в ґрунті»: незважаючи на механізацію, за один день можна вирити та забетонувати лише обмежену довжину траншеї (зазвичай від 2 до 3 захваток), після чого слід чекати тверднення бетону в стиках перед продовженням. Отже, при великих об'ємах підземних стін метод вимагає тривалого часу або залучення кількох комплексів одночасно.

- **Необхідність спеціального обладнання та кваліфікації.** Більшість сучасних методів глибокого закладання вимагають дорогого спеціалізованого обладнання. Так, для занурення тонкостінних оболонок потрібні потужні віброзанурювачі або кабестани з великим крутним моментом. Для влаштування «стін в ґрунті» потрібні імпорتنі грейферні екскаватори або гідрофрези, бентонітозмішувальні вузли, очисні установки для суспензії тощо. Застосування збірних елементів великого розміру (панелей, блоків) потребує підйомних кранів великої вантажопідйомності та транспортних засобів відповідної місткості. Наприклад, крупноформатні збірні плити для «стін в ґрунті» значно ускладнюють логістику на тісному міському майданчику. Метод «top-down» вимагає високої кваліфікації інженерного персоналу для координації робіт і геодезичного забезпечення. Помилка в розташуванні палей-колон або затримка з бетонуванням перекриття може призвести до затримок і переробок [46].
- **Якість готових конструкцій та потреба в додаткових оздоблювальних роботах.** У багатьох технологіях (особливо діафрагмових стінах і збірних

опускних колодязях) після демонтажу огорожувальних елементів на поверхнях стін або внутрішніх гранях колодязя з'являються нерівності, шви та невеликі перепади по вертикалі. Типові величини нерівності поверхні діафрагмової стіни можуть сягати від 5 мм до 15 мм за довжини 1 м, що потребує шліфування або нанесення вирівнювальних сумішей перед гідроізоляцією й оздобленням. У мулисто-глинистих водонасичених ґрунтах бентонітова суспензія інтенсивно фільтрується крізь дрібні частинки глини та мулу, що призводить до поступового промивання та зниження товщини фільтраційної «кірки» від 20 % до 40 % протягом перших 24 годин робіт. Втрата стійкості «кірки» викликає локальні обвалення стінок траншей, нерівності поверхні й нерідко просідання прилеглих ділянок ґрунту (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 — Дефекти «стінки в ґрунті» в мулисто-глинистих водонасичених ґрунтах [47]

- В місцях стиків збірних панелей іноді утворюються капілярні тріщини шириною до 0,2 мм, які необхідно ін'єктувати епоксидними або цементними смолами для забезпечення водонепроникності. Поверхні опускних колодязів зі збірних блоків потребують додаткового закладення швів і вирівнювання, особливо якщо всередині планується облаштування експлуатаційного простору (наприклад, технічної камери). У сукупності це призводить до збільшення обсягу оздоблювальних робіт від 5 % до 10 % від загального обсягу внутрішньої обробки підземного рівня, а також до додаткових матеріальних і трудових витрат [48].
- **Економічні та технічні ризики.** Існуючі методи глибокого будівництва часто пов'язані зі значними витратами, а інколи — з підвищеним ризиком для робітників. Кесонний метод, як вже згадувалось, небезпечний виникненням кесонної хвороби й аварій при спадах тиску, тому потребує суворого дотримання техніки безпеки й обмеження глибини занурення. Метод «top-down», хоча й дає вииграш у часі, зазвичай дорожчий через витрати на попереднє влаштування паль-колон, огорожувальних стін і тимчасових конструкцій. Застосування сталевих «king-post» колон вимагає складних операцій з їх вставлення та подальшого бетонування, що є дуже складним і дорогим процесом. Як результат, технологія «зверху-вниз» використовується тільки тоді, коли її переваги (швидкість, безпека на стислому майданчику) переважають додаткові затрати. Щодо опускних колодязів, то їхні недоліки (масивність, трудомісткість) частково вирішуються впровадженням збірних елементів, але в цілому ця технологія все ще потребує багато матеріалу та ручної роботи. Тонкостінні оболонки ефективні лише в піддатливих ґрунтах. При зустрічі з перешкодою (валун, старий фундамент) оболонка може відхилитися або зупинитися, що створює інженерні проблеми. Таким чином, при проектуванні глибокого підземного рівня завжди слід виконувати аналіз ґрунтових умов, гідрогеології, міських обмежень та доступності техніки, щоб обрати

оптимальний метод зведення фундаменту. Кожна технологія має кількісні межі застосування: максимальну глибину, діаметр чи товщину, швидкість виконання. Вихід за ці межі пов'язаний зі значним зростанням вартості або ризиків. Саме тому сучасні дослідження спрямовані на удосконалення існуючих методів (наприклад, комбінація паль і стін, застосування нового обладнання) та розробку нових технологій глибокого будівництва, які б поєднували високу несучу здатність з більшою швидкістю та безпекою виконання робіт [49].

Патент UA 104020 C2, зареєстрований у 2013 р. [50], став концептом запропонованої технології гравітаційного видавлювання. Саме в ньому вперше було поєднано нерухому опалубку, ярусне укладання бетонної суміші з нарощуванням арматурного каркаса та контрольоване опускання всієї конструкції під власною вагою через гальмівний пристрій. У такій конфігурації опалубка монтується одразу по всій довжині майбутньої стіни на рівні її верхнього краю, піднімається на $\geq 0,05$ м вище проєктної відмітки, а бетон укладається суцільними шарами, що після тужавіння послідовно «витискаються» вниз. Завдяки цьому процес стає безперервним, темп робіт зростає, а якість поверхонь відповідає стаціонарній опалубці.

Алгоритм дій виглядає так. Спершу під захистом тиксотропного розчину розробляють траншею й встановлюють риштування, яке сприймає всі тимчасові навантаження. До нижнього краю нерухомої опалубки шарнірно кріплять багаторазове днище, а трос від гальмівної лебідки пропускають через відхиляючий блок — цим створюється керований підвіс (рисунок 1.6).

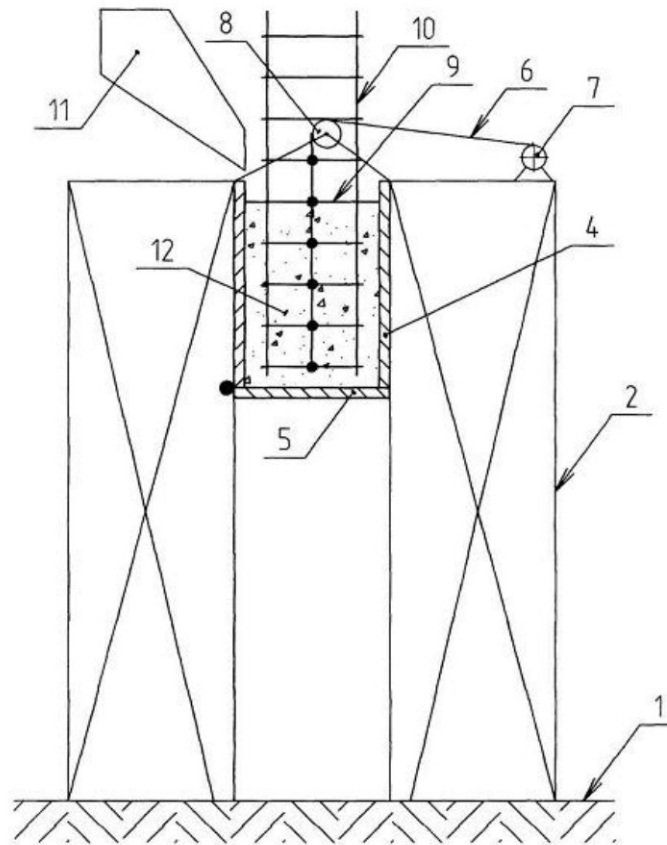


Рисунок 1.6 — Спосіб зведення монолітної будівельної конструкції. 1 — рівень ґрунту; 2 — риштування, що несе опалубку; 3 — споруджувана будівельна конструкція; 4 — нерухома опалубка; 5 — шарнірне днище; 6 — трос, приєднаний до каркаса; 7 — лебідка з гальмом, яка регулює швидкість опускання; 8 — відхиляючий блок; 9 — верхня проєктна відмітка, де трос відсікають; 10 — арматурний каркас; 11 — бетонна суміш, що формує ярус; 12 — перший затужавілий ярус, який служить тимчасовим опорним «днищем».

Далі на днищі нарощують арматурний каркас, одразу приєднуючи його до троса, й укладають перший шар бетонної суміші на всю ширину форми. Після досягнення розпалубної міцності днище відокремлюють, лебідка послаблює трос, і затужавілий ярус разом із каркасом опускається до суміщення з нижнім краєм опалубки. Кожен наступний шар спирається на попередній, а попередній тимчасово виконує роль днища, тож цикл «укласти — витримати — опустити» повторюють доти, доки нижній край

конструкції не досягне проектної глибини. Після останнього ярусу трос обрізають на відмітці верху стіни, опалубку й риштування демонтують, а порожнину траншеї засипають. У підсумку отримують тонкостінну підземну чи надземну стіну без стиків захваток.

Патент заклав три базові механізми: нерухому опалубку, монолітну конструкцію та контрольоване опускання, що є сутністю та перевагою технології гравітаційного видавлювання.

В подальшому технологія гравітаційного видавлювання пропонує запровадити такі зміни для формування нового підходу в виготовленні підземних конструкцій. Замість формування стіни на рівні землі розглядається виготовлення підземної монолітної конструкції всередині вже відритої траншеї. Такий підхід фактично стосується іншого класу споруд — саме підземних або заглиблених стін, а не наземних, як у патенті. Цей підхід не має практичної реалізації і саме тому його ефективність потребує подальших досліджень.

Запропонована заміна згаданого гальмівного пристрою на опорну балку, що є частиною майбутньої стіни. Теоретично вона може скоротити кількість допоміжного обладнання та знизити матеріаломісткість. Проте в майбутніх дослідженнях важливо підтвердити, чи забезпечить така балка достатню несучу здатність та чи не призведе до концентрації напружень у зоні примикання.

Ще одна гіпотетична інновація — використання густішої глинистої суспензії ніж на етапі розробки ґрунту. Передбачається, що щільніша суспензія утворюватиме міцніший шламовий екран, зменшуючи монтажну вагу конструкції при опусканні, що вплине на навантаження лебідки. Необхідні теоретичні дослідження з моделюванням впливу глинистого розчину на монтажну вагу конструкції, що опускається в нього.

Ці покращення дозволяють класифікувати технологію як новий будівельний метод. Загальна схема роботи поєднує елементи двох відомих підходів: ковзної опалубки, де переміщення відбувається в напрямку

бетонування, і класичної «стіни в ґрунті», що характеризується формуванням конструкції у готовій траншеї. Проте, у технології гравітаційного видавлювання рухомим є не опалубний блок, а вже затужавілий елемент, який під дією власної ваги контролювано опускається в траншею. Саме це принципово відрізняє підхід від принципу ковзної опалубки та одночасно дозволяє створювати підземні споруди, що є подобою конструкцій типу «стіна в ґрунті».

1.3 Аналіз технологій влаштування монолітних стін в ковзних опалубних системах

Це система пересувної опалубки, яку поступово піднімають за допомогою домкратів у міру твердіння бетону [51]. Вона встановлюється по периметру споруди (наприклад, шахти ліфта, силосу, ядра висотної будівлі) і переміщується вгору без перерви в бетонуванні (рисунок 1.7). Такий метод дозволяє зводити висотні залізобетонні конструкції без горизонтальних робочих швів, що підвищує монолітність і міцність конструкцій.

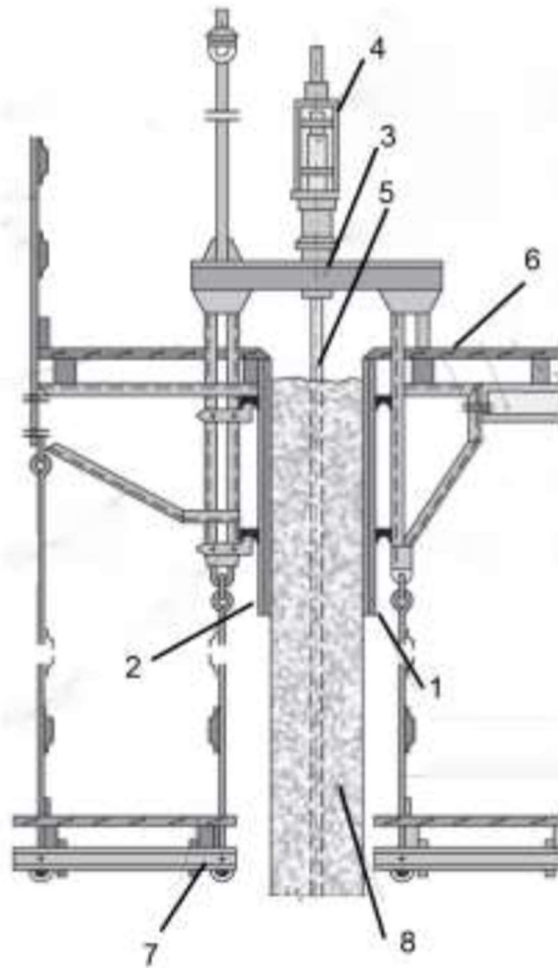


Рисунок 1.7 — Традиційна ковзна опалубна система. 1 і 2 — відповідно, внутрішній і зовнішній формоутворювальний елемент; 3 — домкратна рама; 4 — домкрат; 5 — домкратний стержень; 6 — робоча платформа; 7 — зовнішні підмості; 8 — конструкція, що зводиться.

Серед переваг ковзної опалубки можна виділити наступне: ковзна технологія забезпечує надзвичайно високий темп зведення вертикальних конструкцій до 6 м на добу, що значно перевищує темпи при використанні звичайної переставної опалубки [52]. Монолітність конструкції забезпечує високу якість бетонних поверхонь й економію арматури завдяки відсутності повздовжніх швів. Процес має високий рівень автоматизації за рахунок гідравлічних домкратів, що піднімають опалубку безперервно, а бетон подається за допомогою бетононасосів. Це зменшує потребу у великій кількості робітників. У підсумку, застосування ковзної опалубки дає

можливість суттєво скоротити тривалість будівництва висотних споруд та мінімізувати простір розгортання будівельної системи [53].

Серед обмежень та умов застосування технології можна виділити наступне: технологія ковзної опалубки потребує безперервного щодобового циклу бетонування, тому її реалізація вимагає високої організації праці та надійного постачання бетону. Метод практично не застосовується при від'ємних температурах, оскільки важко забезпечити потрібні умови тверднення бетону при безперервній подачі та укладанні суміші. Економічно доцільним цей метод стає переважно для споруд значної висоти (приблизно 25 м, щоб витрати на підготовку системи окупилися ефектом від прискорення робіт) [54]. Ковзна опалубка не придатна для конструкцій зі складною геометрією або змінною товщиною стін, оскільки система розрахована на типові профілі, що повторюються по висоті.

Сфери застосування. Ковзну опалубку найчастіше використовують при будівництві вертикальних стволів і ядер жорсткості висотних будівель, силосів, димових труб, телевізійних веж й інших баштових споруд.

Технологія ковзної опалубки передбачає безперервний рух опалубки під час бетонування вертикальної конструкції. Опалубні щити повільно й рівномірно піднімаються вгору за допомогою домкратів, поки нижче триває тверднення достатнього для самонесучості шару бетону. Процес відбувається в наступних етапах: бетонна суміш укладається безперервно, а опалубка підіймається зі швидкістю в середньому від 4 м до 8 м за добу (приблизно від 0,15 м/год до 0,3 м/год) [55]. Це забезпечує зведення всієї конструкції практично без робочих швів, оскільки бетон укладається постійно по мірі зростання стіни. У висотному будівництві ковзна опалубка дозволяє зводити монолітні шахти ліфтів чи силоси значної висоти одним безперервним циклом, що від 5 до 7 разів швидше за класичний цикл з переставною опалубкою [56]. Важливо, що рух опалубки синхронізований з тужавінням бетону: поки свіжа суміш зверху набуває початкової міцності, нижче неї форма вже поступово

піднімається. Таким чином, кінематика ковзної опалубки — це неперервний вертикальний підйом форми та одночасне нарощування стіни зверху-вниз.

За результатами детального дослідження ковзних опалубних систем була опублікована стаття «Класифікація ковзних опалубних систем» [57]. Метою було розробити класифікацію опалубних систем, яка відображає розвиток технології та дозволяє обґрунтовано підбирати опалубку під конкретні будівельні умови. Для цього проаналізовано вітчизняні та зарубіжні публікації, патенти та практичні реалізації, й окреслено ключові конструктивні чинники, що визначають ефективність ковзної опалубки.

Основою запропонованої класифікації стали три взаємопов'язані блоки. Перший стосується формоутворювальних елементів: розмір і конфігурація щитів, їхня геометрична сталість або керована змінність, положення та матеріал контактної поверхні, а також способи кріплення, які мінімізують зчеплення з тверднучим бетоном. Другий блок охоплює опорну частину системи, де розглядаються способи обпирання (на зведену конструкцію, зовнішні опори чи комбіновані рішення), тип домкратних рам (охоплюючі або дискретні) та розташування домкратних стрижнів. Третій блок пов'язаний із механізмом переміщення: рухомими елементами (сама опалубка або конструкція, що опускається), напрямом руху (вертикальним, горизонтальним чи комбінованим), типами домкратів від механічних до гідравлічних і рівнем автоматизації керування.

Компактна схема інтегрує всі перелічені ознаки й слугує механізмом, який дає можливість порівняти різні види ковзних опалубних систем й оцінити їхній потенціал щодо швидкості зведення, трудомісткості та якості готових конструкцій (рисунк 1.8).

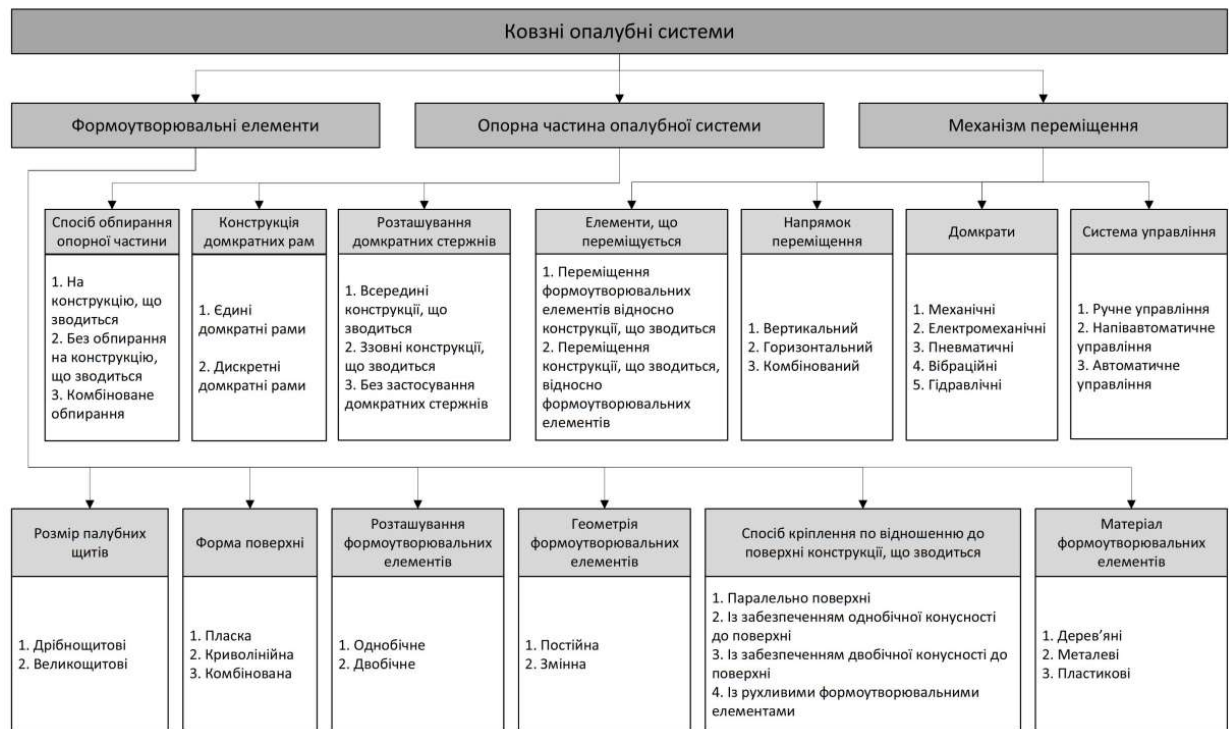


Рисунок 1.8 — Класифікація ковзних опалубних систем

Така структуризація не лише спрощує вибір оптимального рішення, а й утворює методичну базу для подальших досліджень і стандартизації.

1.4 Постановка завдань дослідження

Порівнюючи обидва методи, можна побачити, що вони мають потенціал для доповнення один одного в різних інженерних задачах. Саме тому технологія гравітаційного видавлювання була розроблена як поєднання їх принципів. Вона покликана забезпечити можливість будівництва глибоких підземних стін (область «стіни в ґрунті») без перерв і швів (перевага ковзної опалубки). Наведена порівняльна таблиця 1 підтверджує, що жодна з вихідних технологій окремо не забезпечує одночасно всі необхідні характеристики: безперервність формування, гладку поверхню, мінімальну матеріаломісткість і застосування в ґрунті. Отже, існує об'єктивна потреба в подальшому аналізі та розвитку комбінованого підходу. На основі розуміння сильних сторін ковзної опалубки (швидкість, монолітність) та методу «стіна в ґрунті» (глибина, стабільність у ґрунті) необхідно виконати оцінку їхніх недоліків й

обмежень, щоб обґрунтувати напрямки удосконалення технології гравітаційного видавлювання. Це дозволить сформувати рекомендації щодо подальших досліджень і практичного застосування нового методу, який поєднає переваги обох прототипів.

Таблиця 1 — Порівняння ключових параметрів технологій ковзної опалубки та «стіна в ґрунті»

Ковзна опалубка	«Стіна в ґрунті»
Параметр: характер процесу бетонування	
Безперервний вертикальний процес: бетонна суміш укладається шар за шаром без перерв, паралельно з постійним підйомом опалубки. Це забезпечує монолітність конструкції без холодних швів.	Циклічний процес: конструкція зводиться дискретними секціями (панелями). Кожну панель бетонують окремо в підготовленій траншеї, після чого переходять до наступної. Між секціями утворюються робочі шви, які потребують герметизації та зчеплення.
Параметр: опалубка та середовище	
Рухома опалубка: форми (щити) піднімаються гідродомкратами вгору з середньою швидкістю приблизно від 4 м до 8 м за добу. Опалубка переміщується у напрямку бетонування, а нижче неї бетон твердне до самонесучого стану. Процес відбувається над рівнем ґрунту, у відкритому просторі.	Стаціонарна опалубка/ґрунт: бетонування відбувається в траншеї, заповненій тиксотропним розчином (бентонітовим шламом) для підтримки стінок. Опалубні елементи застосовуються локально — зокрема, щитові перегородки (ендшпунти) для розділення секцій. Після укладання бетонної суміші панель твердне на місці.

Продовження таблиці 1

Ковзна опалубка	«Стіна в ґрунті»
Параметр: застосування та конструкції	
Висотні монолітні споруди: шахти ліфтів, силоси, димарі, водонапірні башти, ядра висотних будівель тощо. Оптимально для високих вертикальних конструкцій постійного перерізу або з поступовою зміною перерізу. Дозволяє зводити круглі або конічні форми, конструкції зі звуженням чи розширенням по висоті.	Глибокі підземні стіни: утримувальні стіни котлованів, стіни підвалів і тунелів, огороження ґрунту для глибоких фундаментів. Застосовується при глибинах >10 м, коли необхідно забезпечити стійкість ґрунту та водонепроникний бар'єр. Необхідна умова — це ґрунт, що дозволяє виконати траншею.
Параметр: швидкість виконання робіт	
Дуже висока: бетонування і підйом форми тривають цілодобово, що дає приріст висоти приблизно від 0,15 м/год до 0,3 м/год (від 4 м до 8 м на добу). За рахунок безперервності метод приблизно від 5 до 7 разів швидший за традиційне поярусне бетонування. Весь об'єм конструкції зводиться за один цикл.	Помірна або низька: цикл виконання однієї панелі (копання траншеї, установка каркаса, бетонування) триває від кількох діб до тижня залежно від розмірів захватки й умов. Одночасно, зазвичай, працюють на одній секції, тож загальна тривалість проєкту значна. Проте роботи можна виконувати секційно, плануючи паузи між бетонуванням окремих захваток.

Продовження таблиці 1

Ковзна опалубка	«Стіна в ґрунті»
Параметр: якість поверхні та точність	
Вимагає високої точності монтажу опалубки та ретельного контролю складу бетону. Поверхні, отримані в ковзній опалубці, часто потребують додаткового оздоблення через тертя при ковзанні (складно отримати фасадну якість). Необхідно підтримувати рівномірний підйом без перекосів, аби уникнути нерівностей.	Якість поверхні визначається станом ґрунту і шламу: одна сторона стіни без опалубки має грубий контакт із ґрунтом (можливі нерівності, «кірка» бентоніту), інша сторона може формуватися опалубкою біля поверхні. Верх секції після тверднення зазвичай обрізається для видалення слабкого шару, забрудненого глиною. Точність положення стіни залежить від геодезичного контролю при копанні та встановленні каркаса. Відхилення можливі при осипанні ґрунту чи зміщенні каркаса.
Параметр: матеріалоемність і вартість	
Ефективне використання опалубки: форма збирається один раз і багаторазово використовується при підйомі, не потребує переміщення кранами на кожний ярус. Це знижує трудомісткість. Однак потрібні спеціальні домкрати, робочі платформи, системи підйому — а це висока початкова вартість обладнання.	Великі матеріальні затрати: необхідні роботи з влаштування напрямляючих стінок, постачання та утилізації глинистого розчину, використання спеціалізованих грейферів або фрез для виїмки ґрунту та потужних насосів для бетону. Початкові інвестиції в техніку й організацію процесу високі.

Кінець таблиці 1

Ковзна опалубка	«Стіна в ґрунті»
Параметр: матеріалоемність і вартість	
Економічно доцільно для великого обсягу робіт. Для невеликих об'ємів витрати на підготовку можуть бути невиправдані.	Метод економічно виправданий переважно для великих підземних споруд або при будівництві в стислих умовах коли роботи у відкритому котловані неможливі.
Параметр: особливі вимоги та обмеження	
Потребує безперебійного постачання бетону за жорстким графіком і безперервної роботи бригади. Не можна переривати бетонування через ризик утворення холодного шва та втрати монолітності. Чутливий до температур: за морозів технологія ускладнена, так як важко забезпечити потрібну швидкість тверднення. Також вимагає високої кваліфікації персоналу для контролю процесу. Не придатний для тонких стін, так як мінімальна товщина обмежена для забезпечення жорсткості та розміщення арматури.	Потребує стабільних ґрунтових умов під час виконання панелі, адже необхідно підтримувати рівень і властивості бурового розчину, щоб не сталося обвалу траншеї. Вразливість до геологічних ризиків, оскільки пливуні та великі валуни можуть ускладнити виїмку. Необхідна ретельна координованість операцій, адже після виїмки ґрунту слід швидко занурити каркас і залити бетон, щоб траншея не залишалась відкритою надто довго. Міжсекційні шви — це потенційні місця протікання. Потрібне встановлення водонепроникних елементів (гермотросів, замків) і належне з'єднання сусідніх панелей.

Нижче описано основні ризики ковзної опалубки.

- **Зрив безперервності процесу.** Будь-яка вимушена зупинка подачі бетону (несправність бетононасоса, нестача матеріалу, перебій електрики) може спричинити утворення холодного шва та втрату монолітності конструкції. Це ключовий ризик методу безперервного бетонування.
- **Недостатнє тверднення нижніх шарів.** Якщо бетонна суміш не встигає набрати потрібну початкову міцність після виходу з-під опалубки, то свіжа конструкція може деформуватись або зруйнуватись під власною вагою чи від вібрації. Ризик зростає при неправильно підібраному складі бетону, низькій температурі або надто швидкому темпі підйому опалубки.
- **Неоднорідність і дефекти бетону.** Через шарове укладання існує небезпека поганого зчеплення між шарами, якщо інтервал укладання коливається. Недостатнє ущільнення (вібрування) кожного шару може спричинити пустоти чи розшарування. Надмірне вібрування, навпаки, здатне дестабілізувати ще пластичний бетон, який знаходиться нижче.
- **Відхилення геометрії, заклинювання опалубки.** Некоректна робота домкратної системи (асинхронність ходу, різниця тисків) може призвести до перекосу опалубки. Якщо опалубка зазнає заклинювання (наприклад, через налипання застиглого бетону), то виникне пауза в бетонуванні та ризик аварії.
- **Безпека праці та контроль.** Оскільки роботи ведуться на висоті, а платформа постійно рухається, то помилка або недогляд можуть призвести до травм. Втома персоналу при роботі в цілодобовому режимі теж є фактором ризику. Необхідна чітка координація між бетоноукладальниками, операторами домкратів і технологом, оскільки збій у комунікації — це потенційне джерело небезпеки.

Нижче описано основні ризики методу «стіна в ґрунті».

- **Обвал або дестабілізація траншеї.** Головна небезпека — це руйнування стінок відкритої траншеї під час копання або перед бетонуванням. Це може

статися через недостатній рівень або густину бурового розчину, непередбачені ґрунтові умови (осипання піску, наплив глини, пливун) чи зовнішні вібрації. Обвал траншеї не лише зупиняє роботи, а й становить пряму загрозу життю робітників і призводить до втрати вже виконаного обсягу, оскільки обвал ґрунту заповнює виїмку.

- **Дефекти заповнення бетоном.** При бетонуванні під шламом можливі кілька критичних ризиків: неповне витіснення шламу (залишки суспензії утворюють «кишені» і слабкі зони в тілі стіни), розрив безперервності бетонування (якщо подача бетону перерветься до заповнення секції, то утвориться дефектний шар), сегрегація бетонної суміші (при надто рідкій суміші або неправильному введенні труби) і затвердіння бетону навколо труби (якщо трубу підняти вище рівня бетону, то суміш перестане захищати отвір і може затужавіти в трубі). Усі ці випадки призводять до порожнин або неоднорідностей всередині стіни, які важко виявити та виправити після тверднення.
- **Проблеми з армуванням і стиками.** Арматурні каркаси «стіни в ґрунті» дуже масивні та довгі. При їх опусканні в траншею є ризик деформації каркаса (вигин, зсув стержнів) або контакту із боковими стінками траншеї, особливо якщо трапиться звуження виїмки. Це може порушити захисний шар бетону або завадити установці каркаса на проектну глибину. Крім того, місця стику між секціями (торцеві грані раніше забетонованої секції) можуть мати налиплий шлам або нерівності. Якщо їх не очистити належним чином або не встановити водостійкі прокладки, то герметичність шва не забезпечиться. Протікання в шві — це один з основних ризиків для «стіни в ґрунті».
- **Відмова обладнання або помилки персоналу.** Процес спорудження «стіни в ґрунті» є складним і потребує кількох етапів: копання, встановлення арматури та бетонування з різним обладнанням. Несправність бурового грейфера чи фрези під час виїмки або вихід з ладу бетононасоса посеред

бетонування панелі створює аварійну ситуацію. Також важливо брати до уваги фактор часу: наприклад, якщо затримка з заливкою бетону перевищить кілька десятків хвилин, то зростає ризик обвалу стінок або затвердіння раніше укладеного бетону в трубі. Людський фактор також важливий, оскільки помилки при контролі якості шламу, неточності в розмітці завхаток і недотримання технології при перекриванні струменя бетону в трубі можуть мати серйозні наслідки.

- **Екологічні та суміжні ризики.** Робота зі шламом і виїмка ґрунту несуть такі екологічні ризики: розлив бентонітового розчину на поверхні, забруднення ґрунтових вод при витіканні шламу через тріщини й осідання сусідніх будівель при недосконалому тампонажі пустот. Також видалення великого об'єму ґрунту може вплинути на напружений стан масиву та викликати осідання навколишнього ґрунту, якщо стіна виконана не досить швидко або виникли порожнечі.

Проведений порівняльний аналіз технології ковзної опалубки та методу «стіна в ґрунті» підтвердив, що кожна з цих технологій має очевидні переваги, та, відповідно, високу швидкість зведення монолітних конструкцій і здатність спорудження на значну глибину із забезпеченням стійкості у ґрунті. Водночас виявлено низку суттєвих обмежень, які стримують універсальне застосування зазначених методів. Зокрема, ковзна опалубка фактично не придатна для роботи за від'ємних температур через труднощі з безперервним бетонуванням і термообробкою бетону. Крім того ця технологія потребує безперебійного постачання бетонної суміші за суворим графіком протягом тривалого часу виконання робіт. Додатковим викликом є потреба у використанні спеціалізованого обладнання та залученні висококваліфікованих фахівців для його експлуатації, що ускладнює широке впровадження методу. «Стіна в ґрунті», у свою чергу, хоча й забезпечує надійну підпірну конструкцію на великій глибині, але характеризується високою початковою вартістю та значною тривалістю виконання робіт. Реалізація цього методу вимагає застосування спеціальної техніки та навченого персоналу, а ефективність може

істотно знижуватися в складних інженерно-геологічних умовах (наприклад, у скельних або сипких ґрунтах) [58]. Таким чином, жодна з розглянутих технологій не позбавлена недоліків: перша обмежена умовами безперервного бетонування та вимогами до обладнання, а друга — ресурсомісткістю й залежністю від ґрунтових умов. Це обумовлює необхідність пошуку рішень, що дозволять нівелювати означені вади та розширити сферу ефективного застосування цих методів.

Відповідно до виявлених проблем сформульовано такі основні завдання подальших досліджень:

- дослідити вплив ключових технологічних і зовнішніх факторів на ефективність та якість зведення залізобетонних конструкцій за технологіями ковзної опалубки та «стіна в ґрунті». Це передбачає визначення, яким чином параметри бетону, режим його тверднення, температурно-вологісні умови, характеристики ґрунту й інші чинники впливають на перебіг та результати будівельного процесу;
- розробити вдосконалену методику зведення монолітних будівельних конструкцій, що поєднує переваги швидкісного монолітного бетонування та глибокого занурення конструкції в ґрунт, мінімізуючи виявлені недоліки обох технологій. Зокрема, доцільно запропонувати технологічне рішення, яке забезпечить монолітність споруди без перерв у бетонуванні й одночасно дозволить формувати підземну частину стіни з необхідною стабільністю в ґрунті;
- перевірити ефективність запропонованих рішень шляхом теоретичного моделювання та теоретичних досліджень. На основі отриманих результатів розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо раціонального вибору або комбінованого застосування технологій ковзної опалубки та «стіни в ґрунті» залежно від умов конкретного проєкту (висотності споруди, необхідної глибини підземної частини, типу ґрунтів, кліматичних умов тощо).

Висновки до першого розділу

1. Проведено аналіз існуючих методів зведення вертикальних підземних конструкцій великої глибини, до яких належать бурові опори великого діаметра, буросічні стіни, опускні колодязі, кесони, тонкостінні оболонки, стіни в ґрунті, а також розглянуті технології будівництва «вверх-вниз» і «зверху-вниз». Визначено їх конструктивні особливості, технологічні можливості, глибини застосування та обмеження. Установлено, що жоден з існуючих методів не є універсальним для умов щільної міської забудови, водонасичених або нестійких ґрунтів. Зокрема, методи з відкритим котлованом неефективні за високого рівня ґрунтових вод, а методи з кесонами — складні та дорогі. Також всі методи мають обмеження за глибиною, продуктивністю або геометрією конструкції.

2. Виявлено ключові проблеми реалізації глибоких стінових конструкцій: низька швидкість виконання, висока матеріаломісткість, обмеження за геометрією конструкцій, складність забезпечення монолітності та водонепроникності у місцях стиків, а також значні витрати на опоряджувальні роботи та корекцію дефектів поверхні.

3. Виявлено, що метод «стіна в ґрунті» хоча й домінує у підземному будівництві, але має циклічний характер бетонування, створює шви між захватками та потребує тривалого часу на тверднення. Ковзна опалубка, натомість, забезпечує високу швидкість та безперервність бетонування, але не придатна для зведення конструкцій у ґрунтовому середовищі.

4. Запропонована технологія гравітаційного видавлювання поєднує переваги обох підходів: безперервність формування монолітної конструкції (як при ковзній опалубці) і можливість виготовлення у відкритій траншеї під захистом глинистого розчину (як при «стіні в ґрунті»). Це створює передумови для розробки нового методу з потенційно вищою продуктивністю, якістю поверхні та водонепроникністю. Таким чином, за результатами аналізу визначено об'єктивну необхідність у створенні комбінованої технології, яка б

дозволяла зводити підземні монолітні конструкції великої глибини з високою швидкістю, високим рівнем монолітності та контрольованими характеристиками якості. Це обґрунтовує вибір напрямку подальших досліджень, викладених у наступних розділах дисертації.

РОЗДІЛ 2

ВИЯВЛЕННЯ, ВІДБІР ТА СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ТА ТРУДОМІСТКІСТЬ ПРОЦЕСУ ВЛАШТУВАННЯ СТІН В ҐРУНТІ

2.1 Методика і методи дослідження

У другому розділі «Методика дослідження і моделювання процесу виготовлення конструкції методом гравітаційного видавлювання» сформульовано загальну методологію відбору та класифікації факторів впливу [59]. У результаті всі фактори були розподілені за чотирма групами: конструктивні параметри самої стінової конструкції, параметри бетонної суміші, конструктивні параметри модуль-форми та інші фактори. Для кожного фактора чітко визначено діапазон змін і нормативні чи оптимальні значення. Такий ретельний опис дає змогу застосувати подальше математичне моделювання, оскільки кожен фактор представлено як незалежну змінну з визначеним інтервалом й межами.

Наступним кроком було залучення експертного опитування, де найбільш критичні фактори впливу оцінювали фахівці будівельної галузі [60-61]. Цей факторний добір забезпечив відсіювання малоефективних чи надто складних для оцінки змінних, аби сконцентруватися на тих, що дійсно формують якість та швидкість процесу.

В третьому розділі застосовано математичне моделювання й аналітичний аналіз для дослідження таких ключових питань: монтажної ваги конструкції, тривалості технологічних етапів, їх продуктивності та собівартості [62]. У розділі «3.1 Дослідження монтажної ваги конструкції, що виготовляється методом гравітаційного видавлювання» методика полягає в тому, що монтажна вага стінової конструкції розкладається на суму векторів сил (власна вага бетону та арматури, вага опорної балки й інших елементів оснастки, виштовхувальна сила, сила тертя глинистого розчину та опалубки).

Це моделювання дозволило поетапно врахувати кожен компонент: власну вагу конструкції, вагу оснащення і виштовхувальну силу. Далі було виконано серію параметричних досліджень. При фіксованих геометричних величинах у межах заданих інтервалів міняли щільність глинистого розчину та спостерігали, як змінюється монтажна вага Q . Аналогічні дії були виконані для окремого впливу довжини, ширини та висоти конструкції, що дало змогу встановити відносні прирости ваги. Цей підхід класичного математичного моделювання з побудовою функцій залежності забезпечив кількісну оцінку того, як різні параметри впливають на навантаження на опори й опускні механізми.

У дослідженні тривалості, продуктивності та собівартості процесу бетонування конструкції застосовано низку взаємопов'язаних методик, які дозволили одержати кількісні оцінки й обґрунтувати технологічні рішення.

Щодо тривалості, основною методикою став поетапний аналіз кожної операції бетонувального циклу з використанням аналітичного моделювання. Для кожного ключового етапу (монтаж опалубки, армування, подача бетону, пауза на набір міцності, розблокування опор, безперервне бетонування, остаточна фіксація) сформульовано власне рівняння часу. Ці рівняння враховують геометричні параметри конструкції (довжина, висота, товщина стін), параметри обладнання (продуктивність бетононасоса, швидкість монтажу опалубки, продуктивність вібратора), а також технологічні обмеження (інтенсивність подачі бетонної суміші, мінімальні та максимальні граничні значення, необхідні для забезпечення монолітності й уникнення дефектів). На основі отриманого моделювання проведено параметричний аналіз (глибина траншеї, товщина та периметр стін) і порівняно з нормативною межею стійкості траншеї (48 годин), щоб встановити за яких умов бетонування може бути виконано без технологічних збоїв.

У розробці продуктивності використано поєднання нормативно-теоретичних й експериментально-емпіричних методів, а для оцінки собівартості процесу застосовано класичну методику калькуляції.

Таким чином, для кожного напрямку (тривалість, продуктивність, собівартість) застосовано такий комплекс методик: аналітичне моделювання часових залежностей, нормування продуктивності на підставі технічних паспортів й експертних даних, а також калькуляційний підхід до підрахунку витрат із подальшим аналізом. Поєднання цих методик забезпечило обґрунтування техніко-економічної ефективності методу гравітаційного видавлювання для конкретних умов будівництва.

2.2 Виявлення факторів, що впливають на влаштування стін в ґрунті

Виявлення факторів, що впливають на технологію влаштування армобетонних конструкцій методом гравітаційного видавлювання, виконувалось згідно загально відомих методик [63]. До розгляду було залучено максимальну кількість факторів, так як це дозволяє отримати більш об'єктивну картину досліджуваного технологічного процесу. Але при цьому до дослідження неможливо включити всі відомі фактори, оскільки це гіперболічно збільшує обсяги дослідження. Тому в подальшому для дослідження відбиралися лише ті фактори, які мають найсуттєвіший вплив на об'єкт дослідження.

Як фактори розглядалися незалежні змінні, які можливо виміряти з достатнім рівнем точності без ускладнень. Відбиралися однозначні фактори, які сумісні один з одним і не пов'язані між собою кореляційними зв'язками. Кожний фактор має свою область визначення, яка може бути неперервна чи дискретна. В області визначення фактори можуть мати кілька значень, які відповідають кількості його помітних станів. При цьому області визначення, як правило, обмежені.

В процесі дослідження спочатку проаналізовано 27 ключових факторів, що були об'єднані в такі групи: конструктивні параметри конструкції,

параметри бетонної суміші, конструктивні параметри модуль-форм опалубної системи й інші фактори [64].

Далі буде розглянуто групу факторів, що характеризують конструктивні параметри конструкції, виготовленої методом гравітаційного видавлювання. Ці фактори визначають геометричну форму, армування та інші особливості самої конструкції.

Товщина конструкції (x_{11}). У технології «стіна в ґрунті» товщина монолітних щитових перегородок коливається від 0,6 м до 1,5 м, при цьому оптимальними вважаються значення від 1,0 м до 1,2 м. На товщині від 1,0 м до 1,2 м забезпечується необхідна просторова жорсткість і можливість витримувати боковий тиск ґрунту від 300 кПа до 400 кПа, а також великі гідростатичні навантаження без додаткового армування. Збірні панелі для «стіни в ґрунті» товщиною від 0,4 м до 0,6 м забезпечують більш точну геометрію та зменшують обсяг монолітних робіт [65].

У традиційних ковзних опалубках (надземні конструкції) товщина стін становить від 0,12 м до 0,8 м, при цьому товщина від 0,4 м до 0,5 м вважається оптимальною: вона забезпечує достатню жорсткість форми, точний контроль осадки бетону (осадка конуса від 75 мм до 100 мм) і знижує матеріаломісткість від 10 % до 15 % порівняно з товстими стінками [66].

Для технології гравітаційного видавлювання у дослідженні було обрано товщини від 0,4 м до 0,8 м. Нижній поріг визначено мінімальною товщиною для забезпечення стабільності конструкції, що виготовлена в модуль-формі, а верхній — ураховуючи допустимі навантаження на канати та лебідки (приблизно від 200 кН/канат до 250 кН/канат).

Висота конструкції (x_{12}). У традиційних монолітних конструкціях типу «стіна в ґрунті» висота панелей (захваток) зазвичай становить від 8 м до 30 м, що відповідає глибині котловану в міській забудові, де підземні споруди рідко перевищують цю позначку. У спеціалізованих проектах із застосуванням підвищувального обладнання та гідрофрез висота може сягати до 50 м, наприклад у сучасних метрополітенах та глибоких протифільтраційних

екранах. Збірні панелі зазвичай мають висоту від 10 м до 20 м, обмежену вантажопідйомністю монтажного крана та логістикою транспортування. У комплексних проєктах застосовують одночасне встановлення панелей висотою до 25 м, але це потребує спеціальних модульних фрезерних установок [67].

Ковзні опалубні системи використовуються для висот від 20 м до 100 м, зокрема в будівництві силосів, димових труб, шахтних стволів і ядрових стін хмарочосів. У деяких проєктах (споруди до 150 м) застосовують спеціальні багатооператорні домкратні системи [68].

Для технології гравітаційного видавлювання в дослідженні обрано діапазон від 10 м до 50 м. Нижня межа відповідає типовим підземним паркінгам і тунелям «cut-and-cover», верхня — глибоким станціям метро та великим протифільтраційним екранним стінам.

Довжина окремого сегмента конструкції (x_{13}). У методі «стіна в ґрунті» довжина одного сегмента зазвичай становить від 3 м до 6 м для монолітних конструкцій та від 3 м до 4 м для збірних [30].

Модулі опалубки для надземних конструкцій випускаються стандартно від 6 м до 12 м завдовжки, що забезпечує оптимальний баланс між жорсткістю форми та зручністю монтажу. Іноді використовують коротші модулі від 3 м до 6 м для зведення звужуваних або криволінійних елементів.

При гравітаційному видавлюванні сегмент конструкції обмежується довжиною опорної балки, яка може становити від 3 м до 18 м. Для рівномірного контролю опускання та подачі бетону оптимально застосовувати балки довжиною від 6 м до 9 м, але за необхідності їх можна об'єднувати, формуючи безшовну стіну значної протяжності.

Діаметр арматурних стержнів (x_{14}). У методі «стіна в ґрунті» застосовують стержні діаметром від 12 мм до 32 мм, із найбільш поширеним діапазоном від 16 мм до 20 мм, що забезпечує оптимальну несучу здатність і зчеплення з бетоном [69].

В ковзних опалубних системах для безперервного подавання арматури використовують стержні діаметром від 10 мм до 25 мм, при цьому діаметр від

12 мм до 16 мм найкраще підходить для плавного проходження крізь напрямні та узгоджуються з темпом підйому опалубки.

Враховуючи обмеження модуль-форми й необхідність оперативного нарощування каркасу під час опускання, у дослідженні розглянуто стержні діаметром від 12 мм до 16 мм. Це дозволяє поєднати простоту монтажу з достатньою міцністю армування.

Крок арматурних стержнів (x_{15}). Для методу «стіна в ґрунті» вертикальні стержні розташовуються з кроком від 150 мм до 250 мм, що забезпечує необхідний процент армування (приблизно від 0,8 % до 1,2 %) для протидії бічним тискам ґрунту та води. Горизонтальні зв'язувальні елементи укладають з кроком приблизно 200 мм для формування рами жорсткості та рівномірного розподілу навантажень [31].

Для ковзних опалубок через безперервний характер бетонування точність розміщення арматури є критичною, тому крок вертикальних стержнів становить від 150 мм до 250 мм, а крок горизонтальних зв'язків — від 150 мм до 200 мм. Це забезпечує синхронність подачі арматури та підйому опалубки без заклинювання.

Оскільки в технології гравітаційного видавлювання арматуру нарощують безпосередньо під час опускання конструкції в модуль-формі, то необхідне ще більш щільне розташування стержнів для контролю товщини бетонного шару та запобігання розшаруванню. Для дослідження обрано крок від 100 мм до 150 мм, що дозволяє рівномірно розподілити арматуру в тонких (від 0,4 м до 8,0 м) стінах і гарантувати однорідність твердіння.

Маса арматурного каркасу (x_{16}). Для технології «стіна в ґрунті» зазвичай використовують жорсткі просторові каркаси з вертикальними стрижнями, що зварюються або зв'язуються в об'ємні панелі. Питома вага арматури коливається в межах від 100 кг/м³ до 120 кг/м³ бетону. Нижня межа характерна для легких захисних стін в ґрунті, а верхня — для конструкцій, які сприймають значні навантаження або розміщуються у водонасичених ґрунтах. У прикладних умовах стіна товщиною 1,0 м, висотою 20 м і довжиною 6 м

міститиме до 14,4 т арматури. Монтаж таких каркасів на глибину до 20 м потребує важкої підйомної техніки та спеціалізованих робітників [70].

У ковзній опалубці питома вага арматури зростає від 120 кг/м³ до 160 кг/м³. Це зумовлено тим, що конструкції зводяться, як правило, з меншою товщиною (від 0,4 м до 0,5 м), а отже потребують більшої густоти армування для забезпечення жорсткості та протидії деформаціям. Каркас формується з урахуванням безперервного вертикального бетонування, що вимагає високої точності та достатньої стійкості під час підйому.

Технологія гравітаційного видавлювання поєднує ознаки обох попередніх методів. Як і в ковзній опалубці, каркас монтується з верхньої платформи та опускається разом із бетонною конструкцією, однак товщина стіни частіше співпадає з параметрами «стіни в ґрунті». З метою досягнення оптимального балансу між жорсткістю і вагою в дослідженнях питома вага арматури визначається в межах від 120 кг/м³ до 140 кг/м³ з базовим значенням 130 кг/м³ (рисунок 2.1).

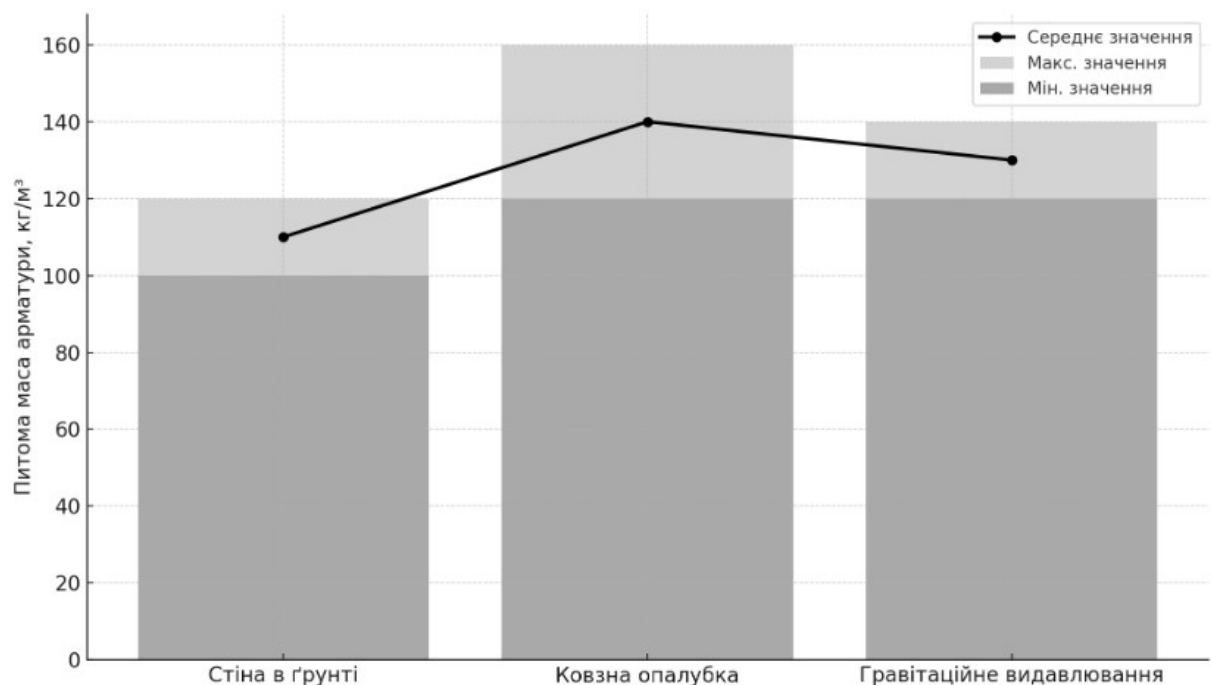


Рисунок 2.1 — Порівняння питомої маси арматурного каркасу для різних технологій

Це забезпечує достатню міцність та стійкість каркасу під час опускання, та водночас не призводить до перевитрати матеріалів, характерної для деяких випадків у ковзній опалубці [55].

Це означає, що для стіни товщиною 0,6 м, висотою 20 м та довжиною 1 м (об'єм 12 м³) буде потрібно приблизно 1 560 кг арматури. У порівнянні з аналогічною стіною, зведеною методом «стіна в ґрунті» (де маса арматури становила би близько 1 200 кг), гравітаційне видавлювання використовує приблизно на 30 % більше сталі, однак за рахунок підвищеної точності та якості формування конструкції дозволяє уникнути швів, деформацій і додаткових витрат на ремонт або гідроізоляцію.

Наступним етапом аналізу є параметри бетонної суміші, що застосовується у технології гравітаційного видавлювання. Ці фактори охоплюють властивості та умови укладання бетонної суміші, які визначають її рухомість, умови ущільнення і подальшого тверднення під час формування конструкції.

Гранулометричний склад заповнювачів (x_{21}). Цей параметр безпосередньо впливає на щільність, пористість і водоцементний коефіцієнт бетонного каменю. Оптимальне співвідношення фракцій у межах від 0,3 мм до 10 мм дозволяє зменшити пористість бетонної маси, що покращує ущільнення суміші та знижує необхідний водоцементний коефіцієнт [71-72].

В методі «стіна в ґрунті» контроль цього параметру дозволяє забезпечити однорідну плинність суміші в глибокій траншеї. При оптимальному складі загальний час бетонування зменшується з 2,5 год/м³ до 1,5 год/м³. Витрати цементу скорочуються від 10 % до 15 % завдяки кращому ущільненню.

Для ковзних опалубних систем надлишок дрібних фракцій (< 0,3 мм) призводить до утворення «шлікеру» та ускладнює подачу бетону у форму. Водночас забезпечується висока плинність для безперервного підйому щитів. Якщо вміст частинок розміром менше 0,5 мм перевищує 20 %, то час

виготовлення скорочується приблизно на 30 %, але міцність одержаного бетону знижується з 25 МПа до 20 МПа (рисунок 2.2).

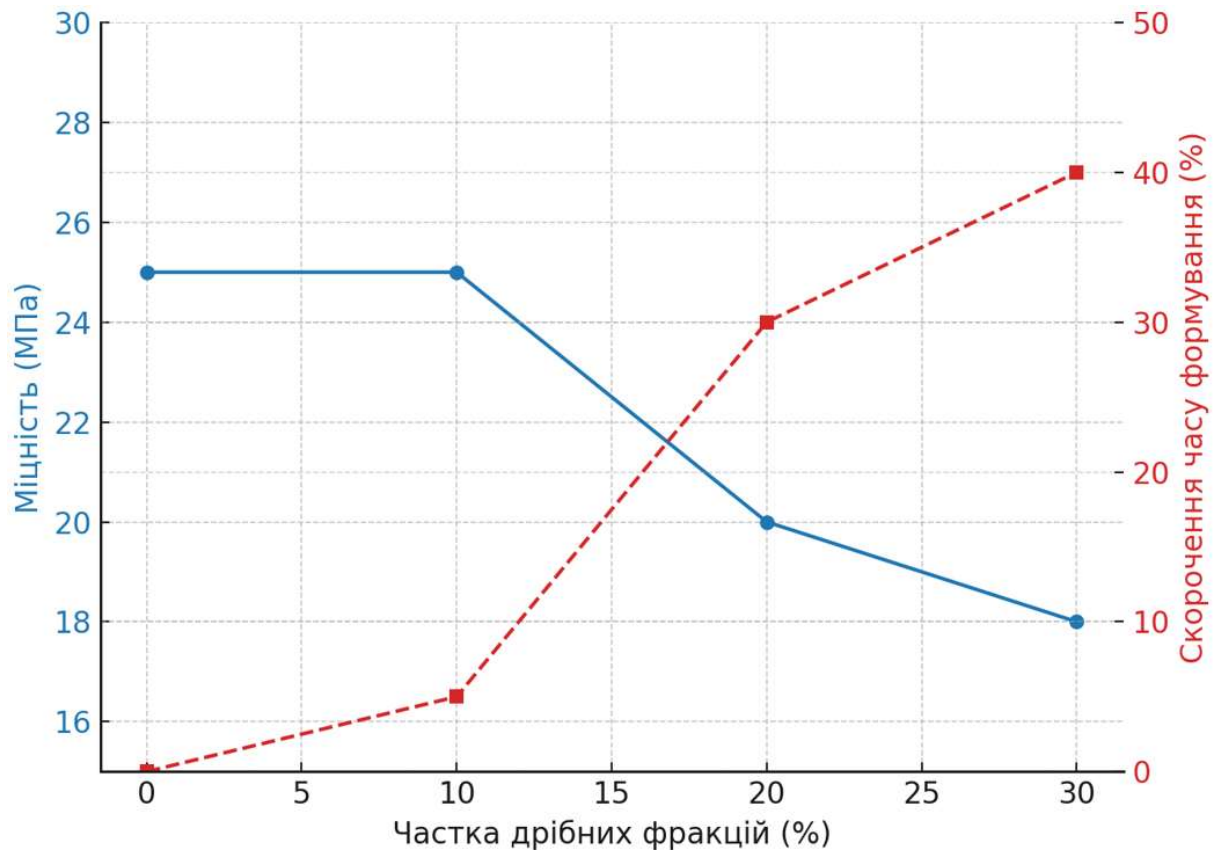


Рисунок 2.2 — Вплив частки дрібних фракцій на міцність і час формування

Для дослідження конструкцій, які зводяться методом гравітаційного видавлювання, було розглянуто співвідношення крупного наповнювача (від 6 мм до 10 мм) в кількості 50 %, середніх фракцій (від 1 мм до 6 мм) — в кількості від 40 % до 45 %, а дрібних частин — не більше 10% (рисунок 2.3).

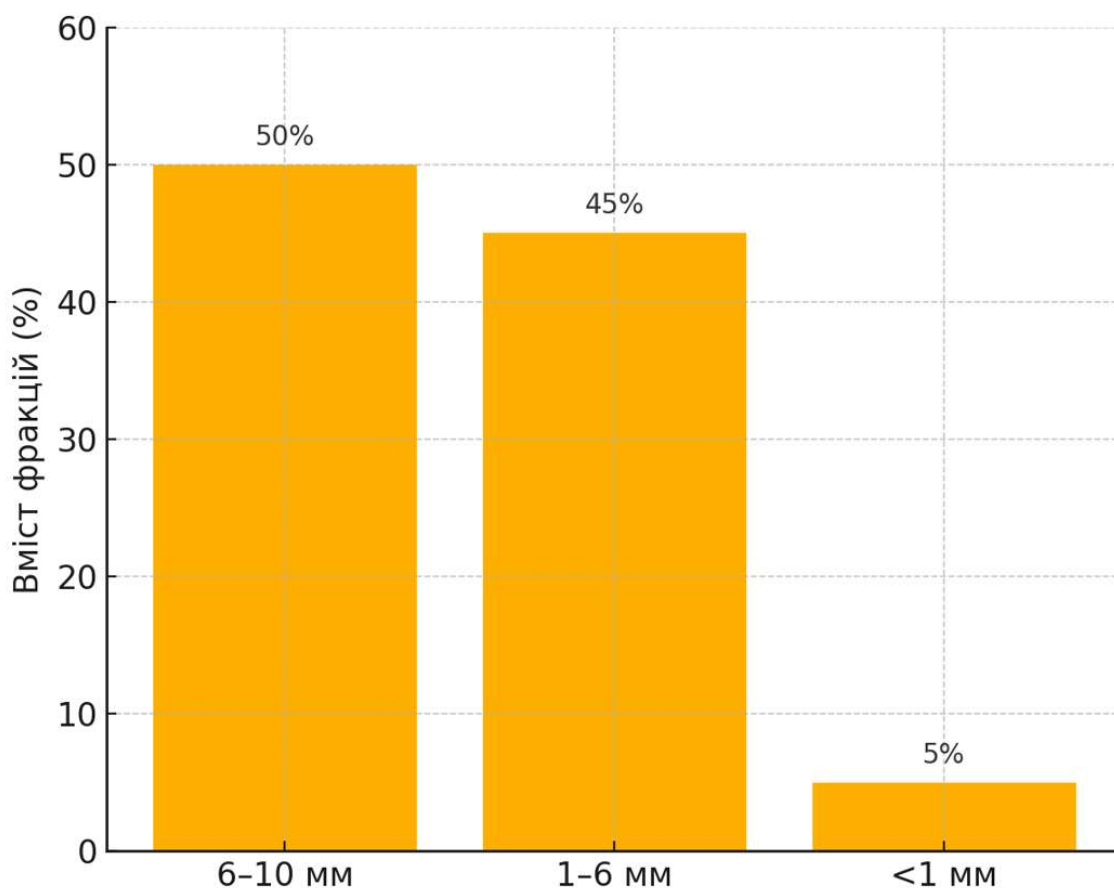


Рисунок 2.3 — Оптимальний розподіл фракцій заповнювачів

Форма зерен заповнювачів. Округлі зерна знижують тертя між частинками, що сприяє підвищенню плинності суміші та пришвидшує заливання. Для методу «стіна в ґрунті» застосування округлих зерен дозволяє скоротити час вертикального заливання з діапазону від 8 хв до 10 хв до діапазону від 7 хв до 5 хв на 1 м³, що відповідає зростанню продуктивності від 20 % до 40 %. Проте збільшення вмісту округлих зерен може призвести до зниження міцності конструкції від 6 МПа до 10 МПа порівняно з гострокутними зернами [73-74].

Гострокутні зерна завдяки більшій площі контакту з цементною матрицею забезпечують кращу адгезію та підвищують міцність конструкції від 10 % до 20 %. Однак підвищений коефіцієнт тертя у разі їх застосування ускладнює подачу бетонної суміші, що може призводити до нерівномірного ущільнення, особливо у вертикальних траншеях. У технології ковзної опалубки застосування гострокутних зерен підвищує від 5 % до 10 % ризик

виникнення дефектів на поверхні під час опускання, але водночас збільшує загальну несучу здатність конструкції від 4 МПа до 6 МПа (рисунок 2.4).

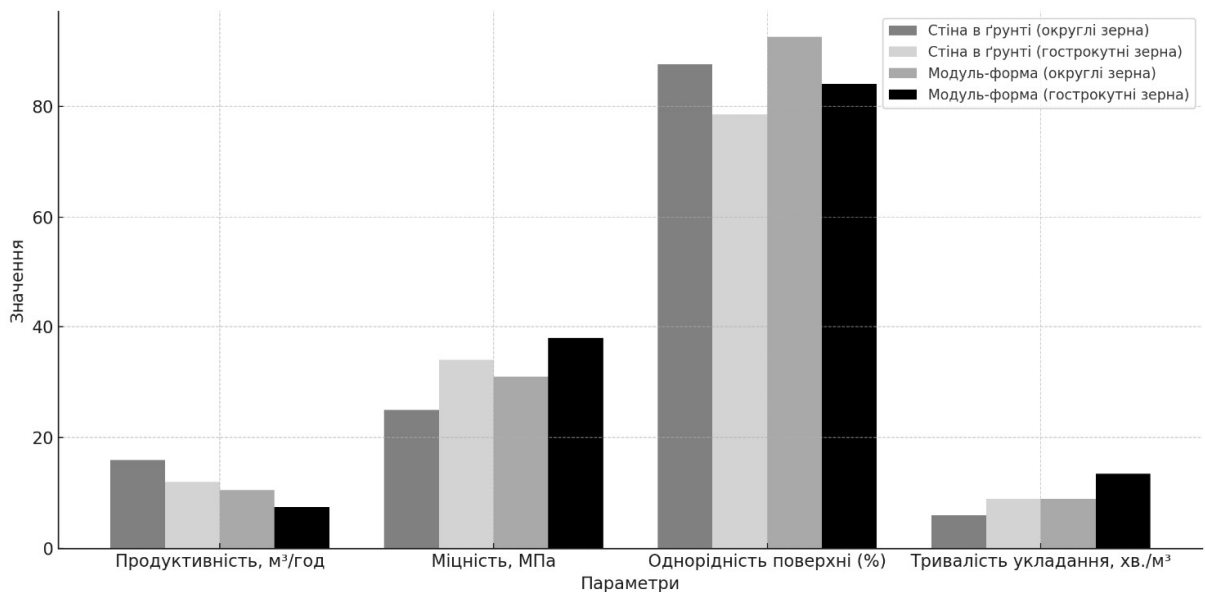


Рисунок 2.4 — Порівняння впливу форми зерен заповнювача на технології «стіна в ґрунті» та ковзна опалубка

Для дослідження конструкцій, які зводяться методом гравітаційного видавлювання, було розглянуто комбінований підхід. Основу та перші шари формують із суміші, в якій переважають округлі зерна для забезпечення кращої плинності та швидкого заливання, а фінішний шар доповнюють від 30 % до 40 % гострокутних зерен для підвищення міцності готового виробу.

Температура бетонної суміші під час укладання (x_{22}). Цей параметр бетонної суміші є критичним, оскільки безпосередньо впливає на процес гідратації цементу, плинність суміші, темпи тужіння та якість готової конструкції. Оптимальний температурний діапазон для укладання бетонної суміші становить від +10 °C до +25 °C [75-76]. Цей інтервал забезпечує рівномірне зміцнення, низький ризик утворення тріщин внаслідок температурних напружень і збереження плинності суміші від 60 хв до 90 хв.

За температур нижче 10 °C гідратація цементу сповільнюється від 50 % до 70 % порівняно з номінальними умовами, що призводить до зростання часу

до початку тужавіння від 5 до 6 годин і ускладнює ритмічну подачу матеріалу в модуль-форму. При температурах вище 25 °С фіксується зменшення часу збереження плинності від 30 хв до 40 хв, що підвищує ризик розшарування суміші та появи пустот через передчасне тужавіння. Такі умови також сприяють втраті міцності від 15 % до 20 % у 28-денному циклі без коригування складу суміші [77].

Для технології гравітаційного видавлювання дотримання температурного режиму є особливо критичним через безперервний характер формування конструкції в модуль-формі. Переривання або різка зміна температурного режиму призводить до неоднорідності структури, порушення монолітності та збільшення усадки.

Для дослідження конструкцій, що виготовляються методом гравітаційного видавлювання, був розглянутий діапазон температур від +5 °С до +30 °С з умовно оптимальним інтервалом від +15 °С до +20 °С, при якому забезпечується баланс між плинністю, часом укладання та набором міцності.

Товщина шару бетонної суміші, що укладається (x_{23}). У ковзній опалубці бетон подається у форму безперервно, тому «товщина шару» більше відповідає висоті підйому форми за одиницю часу, аніж дискретній товщині. Типовий часовий діапазон такого процесу — від 0,2 м/год до 0,3 м/год. Це означає, що шар, який одночасно перебуває у стані ущільнення, становить приблизно від 20 см до 30 см, але розподілений на безліч кроків — по кілька сантиметрів щохвилини. Якщо швидкість підйому форми зростає понад 0,3 м/год, бетон погано ущільнюється знизу, з'являються холодні шви та нерівномірний набір міцності [78-79].

У гравітаційному видавлюванні бетон укладається порціями з чітко визначеною товщиною одного шару перед ущільненням. У дослідженні розглядається діапазон від 0,25 м до 0,35 м за цикл (за один прохід віброзагущувача). Обирається саме така дискретна товщина, аби вібратор одним встановленням повністю пройшов крізь шар й ущільнив його.

Інтенсивність укладання бетонної суміші (x_{24}). У технології «стіна в ґрунті» інтенсивність укладання бетонної суміші в діапазоні від 10 м³/год до 15 м³/год сприяє рівномірному ущільненню суміші та знижує ризик появи пустот. Перевищення рекомендованих значень, наприклад, понад 20 м³/год, може призвести до дефектів на стиках шарів і надмірного розшарування бетонної суміші, особливо на великих глибинах. Крім того, з огляду на те, що час набору міцності бетону в «стіні в ґрунті» зазвичай становить від 24 до 48 годин, надмірна швидкість укладання може перешкоджати належному формуванню монолітного ядра конструкції.

Для вертикальних стінових конструкцій, які виготовляються із застосуванням ковзних опалубних систем, інтенсивність укладання зазвичай вища й коливається в межах від 15 м³/год до 25 м³/год. Це пояснюється точнішим контролем процесу бетонування та меншою чутливістю до розшарування завдяки особливостям рухомої опалубки [55]. Утім, якщо швидкість перевищує 25 м³/год, можуть виникати проблеми зі синхронізацією опускання опалубної системи та ущільненням нижніх шарів, а також із забезпеченням достатнього часу схоплювання (у ковзній опалубці він зазвичай становить від 16 до 24 годин).

Для дослідження конструкцій, які зводяться методом гравітаційного видавлювання, було розглянуто діапазон інтенсивності укладання бетонної суміші від 12 м³/год до 20 м³/год.

Інтенсивність ущільнення бетонної суміші (x_{25}). Це параметр характеризує енергію та рівень механічного впливу, який передається на свіжий бетон для видалення повітряних порожнин, забезпечення щільного контакту між заповнювачами та цементним каменем, а також формування однорідної структури без дефектів.

У стінах в ґрунті зазвичай застосовують вібраційні бруси (тремі-насадки) або вертикальні вібратори, що встановлюються безпосередньо в бетон через трубу-тремі. Тривалість ущільнення приблизно від 20 с до 30 с вібрації на кожний 1 м³ бетону.

У ковзній опалубці бетон ущільнюють зовнішніми та внутрішніми вібраторами, закріпленими безпосередньо на опалубці. Внутрішні вібратори використовують приблизно по 15 с на кожні 0,5 м³ свіжого бетону. Зовнішні вібратори використовують безперервну підтримку опалубки під час руху (частина процесу підйому). Оскільки процес безперервний, то ущільнення здійснюється одночасно з подачею, а ущільнювальні пристрої активні весь час бетонування (без окремих пауз) [57].

Для забезпечення однорідної та щільної структури бетону в технології гравітаційного видавлювання розглянуто інтенсивність ущільнення, яка аналогічна до ковзної опалубки: від 25 с/м³ до 35 с/м³ за допомогою внутрішніх вібраторів та підтримувальної зовнішньої вібрації. Такий режим забезпечує оптимальне поєднання міцності (від 25 МПа до 30 МПа) і низької пористості (від 0,23 до 0,25), що є критично важливим для безшовного формування довгих підземних конструкцій, а також гарантує якість поверхні, яка не потребує додаткової обробки.

Рухливість бетонної суміші (α_{27}). Для методу «стіна в ґрунті» типовий діапазон осадки конуса становить від 180 мм до 220 мм. Таке значення забезпечує достатню плинність, щоб бетонна суміш під дією гравітаційного тиску повністю заповнила вузьку траншею і витіснила глинистий розчин, при цьому зменшуючи ризик утворення порожнин. В умовах глибокої траншеї висока рухливість також сприяє швидшому та однорідному твердненню. Перехід від осадки діапазоном від 180 мм до 200 мм дозволяє скоротити час бетонування однієї секції глибиною 20 м і товщиною 0,6 м з 2,5 до 1,5 годин, а також зменшити витрати цементного розчину від 10 % до 15 % завдяки кращому ущільненню суміші та зниженню водоцементного коефіцієнта.

При використанні ковзної опалубки бетонна суміш повинна бути значно жорсткішою, щоб нижній шар встигав тужавіти під час підйому форми. Тому стандартний діапазон осадки конуса становить від 75 мм до 100 мм. У цьому інтервалі бетон має достатню текучість для подачі у форму. Оптимальними значеннями осадки конуса вважають діапазон від 75 мм до 85 мм, оскільки

нижча осадка (75 мм) забезпечує кращу підтримку вертикальних навантажень, а вища (до 100 мм) полегшує процес ущільнення. Зазвичай при осадці понад 100 мм спостерігається надмірна «липкість» бетону до щитів, що підвищує тертя й ризик нерівностей на поверхні [58].

Для дослідження технології гравітаційного видавлювання було обрано діапазон рухливості від 75 мм до 100 мм (рисунок 2.5).

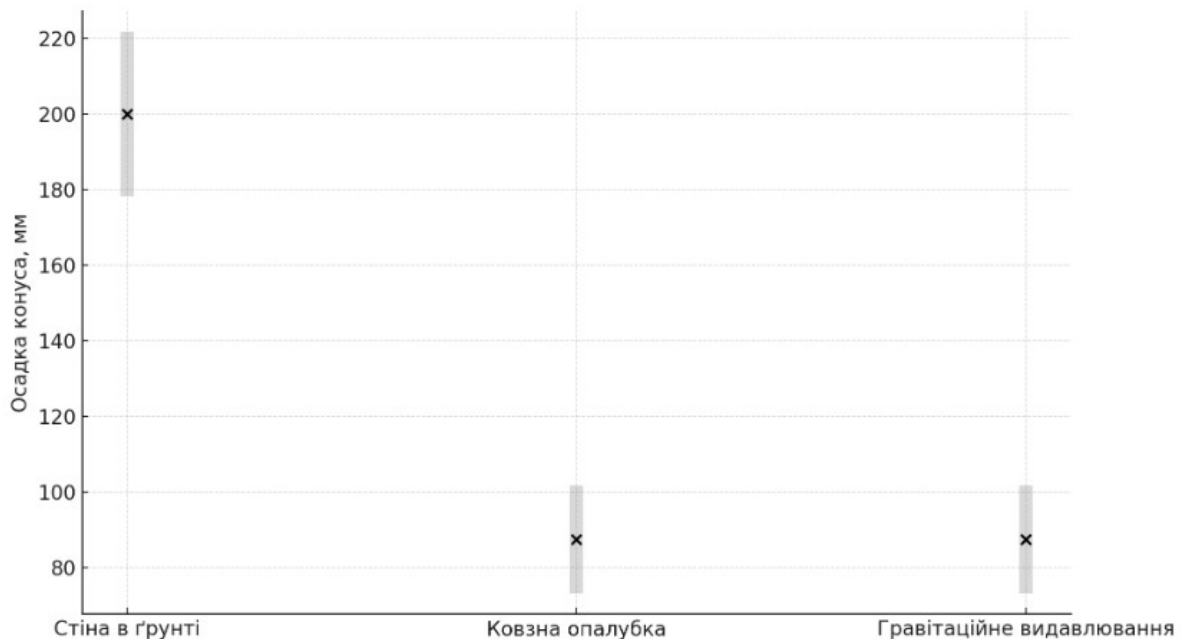


Рисунок 2.5 — Порівняння рухливості бетонної суміші для різних технологій

Ця осадка забезпечує необхідну плинність, щоб бетонна суміш якісно ущільнилась навколо арматури та безперешкодно проходила через вузьку опалубку, при цьому залишаючи час на формування міцного нижнього шару. Осадка нижче 75 мм уповільнює подачу бетону й може спровокувати нерівномірний процес опускання, а вище 100 мм — призвести до зниженої несучої здатності нижнього шару та ризику руйнування його під час видавлювання.

Час початку тужавіння бетону (x_{28}). У класичному методі спорудження «стіни в ґрунті» бетон класу С25/30 укладається під шаром глинистої суспензії з високою рухливістю (осадка конуса ≥ 180 мм). За

лабораторними спостереженнями початок тужавіння в стандартних умовах (температура від $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$) настає від 2 до 5 годин після укладання, коли бетон досягає міцності від 0,01 МПа до 0,05 МПа, що відповідає приблизно 0,5 % від проєктної міцності. У реальних умовах, характерних для глибоких траншей з нижчою температурою суміші (від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$), цей період може подовжуватися до діапазону від 4 до 6 годин.

У технології ковзної опалубки завдяки контрольованим параметрам, а саме підтримці температури суміші в межах від $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ і використанню прискорювачів схоплювання, початок тужавіння настає вже в діапазоні від 2 до 4 годин. Це дозволяє оперативно розпочати технологічний цикл і забезпечити безперервність процесу [56].

Оскільки технологія гравітаційного видавлювання потребує швидкого переходу до опускання першого ярусу без тривалих пауз, то оптимальним є набуття міцності від 0,01 МПа до 0,05 МПа на початку тужавіння. Тому в дослідженні розглядається час в діапазоні від 2 до 4 годин (рисунок 2.6).

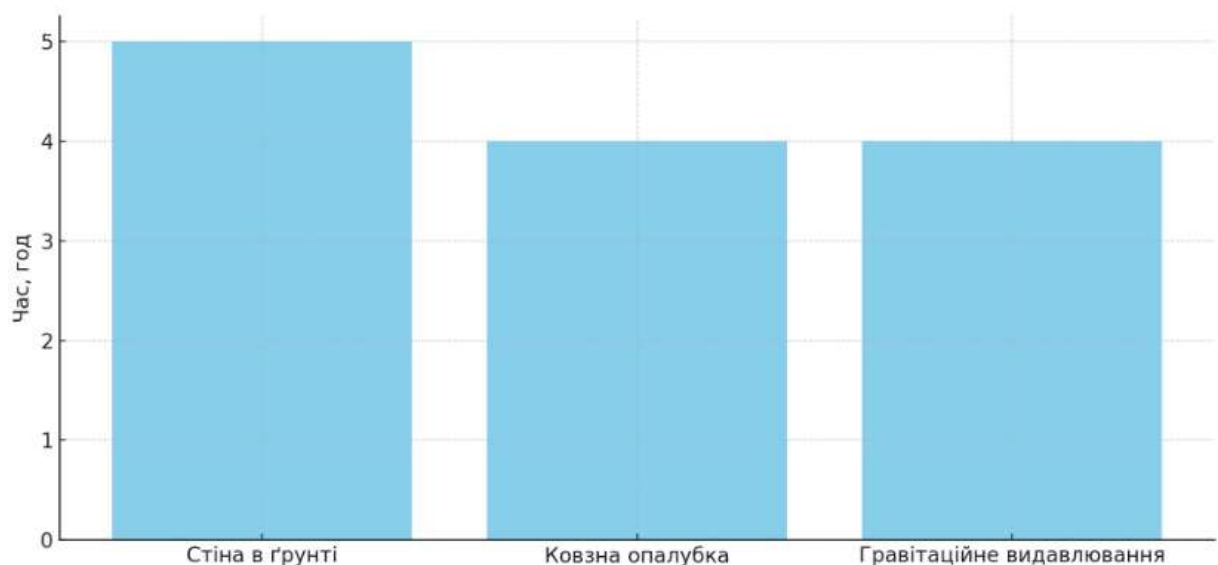


Рисунок 2.6 — Оцінка часу початку тужавіння бетону в різних технологіях

Час набрання розпалубної міцності (x_{29}). У методі «стіна в ґрунті» бетон твердне повільно, що пов'язано з відсутністю підігріву та захищеним

середовищем глинистої суспензії. Для досягнення розпалубної міцності в межах від 0,5 МПа до 1,5 МПа (приблизно від 5 % до 10 % від $R_{(28)}$) за температури від $+10^{\circ}\text{C}$ до $+30^{\circ}\text{C}$ потрібно від 12 до 24 годин, а за температури від $+5^{\circ}\text{C}$ до $+15^{\circ}\text{C}$ — до 36 годин.

У ковзній опалубці завдяки підігріву та прискорювачам гідратації бетон досягає самонесучої міцності вже від 4 до 10 годин. Цей рівень становить від 0,15 МПа до 0,20 МПа і є мінімально необхідним для початку безпечного підйому опалубки без ризику деформацій або сповзання поверхні. Досягнення розпалубної міцності (від 0,5 МПа до 1,5 МПа) у таких умовах можливе до 12 години, що дозволяє знімати упори та продовжувати процес видавлювання без перерв.

У межах технології гравітаційного видавлювання стін початок тужавіння бетонної суміші відбувається орієнтовно від 2 до 4 годин після заливки, що відповідає початковій структурній стабілізації матеріалу. Протягом наступних годин бетон продовжує набирати міцність, досягаючи самонесучого стану в межах від 0,15 МПа до 0,20 МПа, що становить від 1 % до 2 % від проектної міцності. Цей рівень досягається в інтервалі від 4 до 10 годин, що є критичним моментом для запуску процесу видавлювання конструкції з модуль-опалубки (рисунок 2.7).

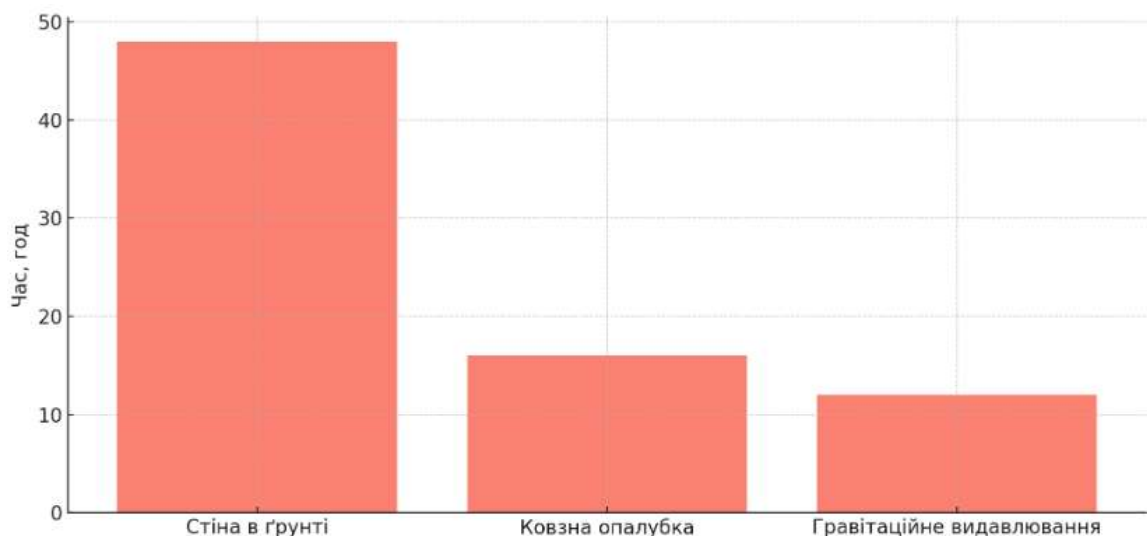


Рисунок 2.7 — Оцінка часу досягнення розпалубної міцності в різних технологіях

Саме в цей період рекомендовано починати екструзію, оскільки бетонна суміш набуває достатньої стійкості для збереження форми під власною вагою без ризику зсуву або деформацій на виході з форми.

Окрему групу становлять конструктивні характеристики модуль-форм опалубної системи. Вони впливають на взаємодію опалубки з бетонною сумішшю і визначають умови стабільного протікання процесу видавлювання.

Розмір опалубних щитів (x_{31}). Типові модулі мають висоту від 1,0 м до 2,0 м, при цьому використання щитів висотою 2,0 м замість 1,0 м скорочує кількість пересувань і стиків на приблизно 28 %, що прискорює загальний цикл зведення стін та знижує питому собівартість монтажу опалубки на приблизно 17 % за рахунок меншої кількості кріплень і прокладок [80].

Враховуючи статичну модуль-форму над траншеєю в армовидавлювальній системі, для забезпечення жорсткості і точності екструзії рекомендовано щити висотою від 1,5 м до 2,0 м, що мінімізує кількість стиків і дає змогу підтримувати оптимальні геометричні параметри готової конструкції під час її поступового опускання.

Нахил опалубних щитів до поверхні конструкції (x_{32}). Цей параметр забезпечує легкість демонтажу модуль-форми та рівномірний розподіл бокового тиску пластичного бетону на щити. Рекомендований діапазон нахилу становить від 2° до 5° від вертикалі [81]. При $< 2^\circ$ щити мають тенденцію прилипати до свіжого бетону, що ускладнює їх знімання та підвищує ймовірність пошкоджень готової поверхні. При $> 5^\circ$ збільшується неточність геометрії стінки та зростає навантаження на опорні елементи модуль-форми.

У дослідженні гравітаційного видавлювання обрано нахил від 2° до 5° як оптимальний для поєднання простоти демонтажу та високої точності формування.

Жорсткість опалубної системи (x_{33}). Цей параметр характеризує здатність опалубної системи протидіяти вигину під дією бічного тиску

пластичного бетону та динамічних навантажень у процесі формування конструкції. Ключовим показником є флексійна жорсткість EI [82-83]:

$$I = \frac{bh^3}{12} \Rightarrow EI = E \frac{bh^3}{12}, \quad (2.1)$$

де b — ширина щита у напрямку перерізу;

h — висота щита (від осі згину до протилежної грані);

E — модуль пружності матеріалу опалубки.

Допустимий прогин щита при навантаженні нормується як:

$$\delta_{max} \leq \frac{L}{240}, \quad (2.2)$$

де L — характерний проліт щита.

Нижче наведено порівняльну характеристику жорсткості щитів опалубної системи для різних технологій (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1

Параметр	Ковзна опалубка	Модуль форма
Модуль пружності E	210 ГПа	210 ГПа
Ширина щита b	0,8 м	1,0 м
Висота щита h	1,2 м	2,0 м
Момент інерції I , м ⁴	0,1152	0,667
Флексійна жорсткість EI , Н*м ²	$2,42 \times 10^{10}$	$1,40 \times 10^{11}$
Допустимий прогин при $L = 2,4$ м	$\lesssim 10$ мм	$\lesssim 10$ мм

Модуль-форма гравітаційного видавлювання ($h=2$ м) має вищу флексійну жорсткість, ніж типовий ковзний щит ($h=1,2$ м) (рисунок 2.8).

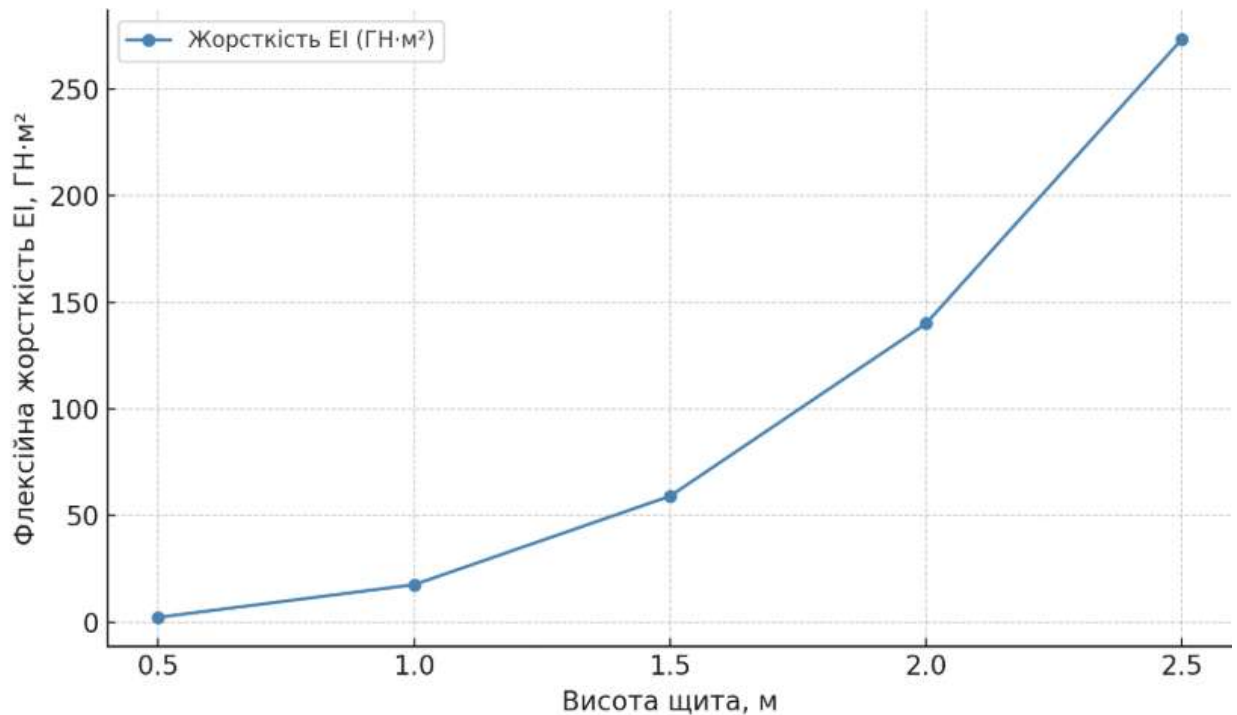


Рисунок 2.8 — Графік залежності флексійної жорсткості від висоти щита

Це забезпечує достатній запас жорсткості для протидії прогину під тиском бетонної суміші й дозволяє застосовувати високу інтенсивність безперервного бетонування без ризику деформацій опалубки.

Пористість матеріалу палуби (χ_{34}). Цей параметр характеризує об'ємну долю пустот (мікропор) у товщі опалубного щита або модуль-форми. Пористість матеріалу палуби визначає водопоглинання та зміни розмірів щита при контакті зі свіжим бетоном, адгезію між поверхнею щита та бетоном (підвищена пористість — це відповідно більше цементного прилипання), довговічність та число циклів багаторазового використання (високе водопоглинання пришвидшує корозію металу чи руйнування деревини або композиту). Нижче наведено порівняння типової пористості матеріалів палуби та їх ресурсу використання (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2

Матеріал опалубного листа	Типова пористість, %	Орієнтовний ресурс, циклів
Сталевий лист з полімерним покриттям	0,01–0,1	>500
Алюмінієвий лист з порошковим покриттям	0,02–0,2	~ 400–500
Фанера ВВ з фенольним просоченням	5–10	~200–250
ПВХ-ламінований полімерний щит	0,5–1,0	~350–450

У дослідженні конструкцій, що зводяться методом гравітаційного видавлювання, розглянуто діапазон від 0,1 % до 0,5 %, щоб врахувати можливе застосування композитних вставок чи ущільнювачів. При зростанні пористості від 0,1 % до 0,5 % вода, що вбирається, збільшується з приблизно 0,02 л/м² до 0,1 л/м² на цикл. Зростає ризик прилипання бетону (підвищується адгезійний опір розділення щит–бетон на 30 %) та зменшується ресурс щита з 500 до приблизно 420 використань.

Для забезпечення високої якості монолітної поверхні та багаторазового використання модуль-форм пористість матеріалу палуби, призначеної для гравітаційного видавлювання, рекомендовано обмежити рівнем не більше ніж 0,5 %. Ідеальне значення при цьому становить <0,2 %, що наближає матеріал до інертних металевих листів і забезпечує мінімальні втрати на адгезію та водопоглинання.

Шорсткість покриття палуби (χ_{35}). Цей параметр визначає силу адгезії між бетонною сумішшю та поверхнею опалубки, що критично впливає

на якість розформування, гладкість поверхні готової конструкції та збереження геометричних параметрів.

Ra (Average Roughness, середнє арифметичне відхилення профілю) — це основний параметр, що характеризує шорсткість поверхні. Він показує середнє значення відхилень висот і заглиблень мікронерівностей профілю поверхні від уявної середньої лінії, виміряне в мікрометрах (мкм) на визначеній довжині [84].

У системах ковзної опалубки застосовуються матеріали з гладким або полімерним покриттям, що забезпечує Ra приблизно від 0,4 мкм до 0,8 мкм [85]. Це зменшує зусилля відриву опалубки від бетону, забезпечує високу якість зовнішньої поверхні конструкції та дає змогу формувати конструкції без додаткового опорядження.

У технології гравітаційного видавлювання опалубні листи (модуль-форми) є нерухомими, а опускається саме конструкція, що вимагає ще меншого коефіцієнта тертя між поверхнею форми та бетоном, тому застосовуються покриття з шорсткістю $Ra \leq 0,6$ мкм для зниження опору під час опускання (рисунки 2.7, 2.8).

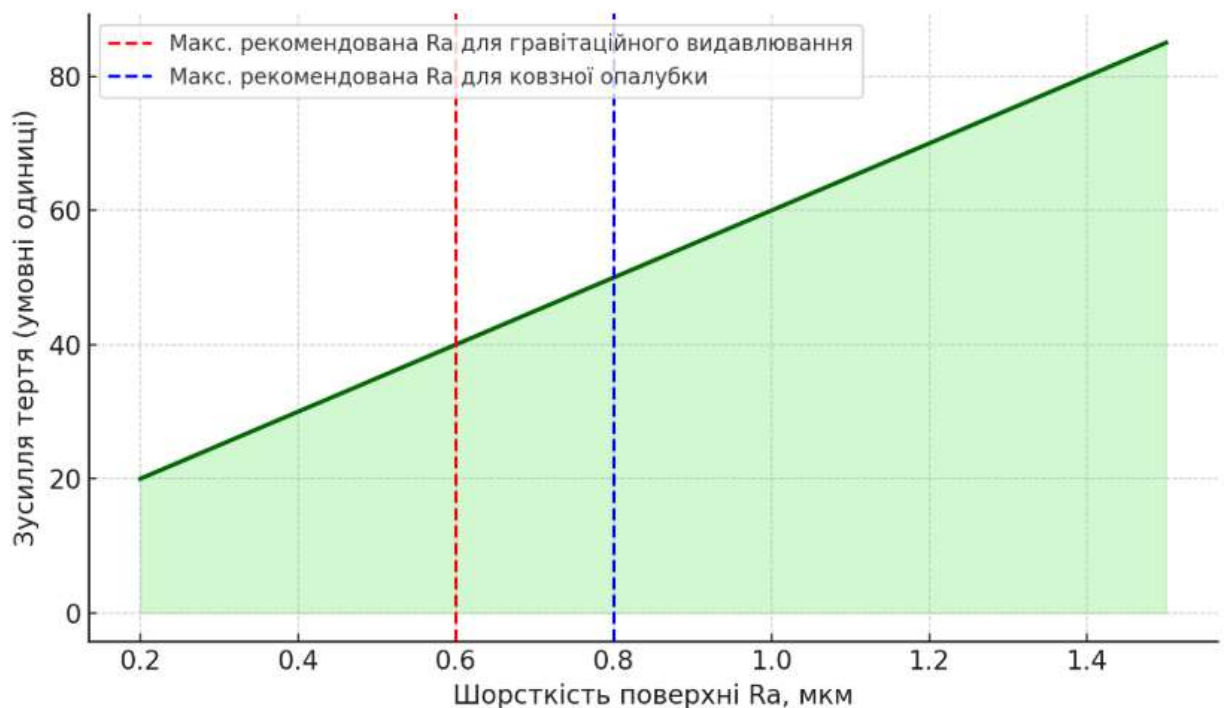


Рисунок 2.8 — Залежність зусилля тертя від шорсткості палуби (Ra)

Також необхідне застосування змащувальних сумішей або просочень для зменшення зчеплення бетону з палубою.

Нижче наведено параметри шорсткості палубного покриття та їх вплив у системах ковзної та модульної опалубки (таблиця 2.3).

Таблиця 2.3

Параметр	Ковзна опалубка	Гравітаційне видавлювання
Рекомендована шорсткість, R_a (мкм)	0,4–0,8	0,3–0,6
Вплив на зусилля відриву (% , умовно)	↓ на 15–25%	↓ на 30–40%
Необхідність змащення	Середня	Висока
Ризик утворення дефектів	Середній	Низький

Для дослідження конструкцій, які зводяться методом гравітаційного видавлювання, було розглянуто шорсткість поверхні палуби R_a на рівні приблизно 0,4 мкм. Це дозволяє значно знизити тертя між формою і конструкцією та забезпечити безперервне та контрольоване опускання.

Маса армовидавлювальної системи гравітаційного видавлювання (x_{36}). Армовидавлювальна система має повну висоту в розмірі 4 метри, де нижні 2 м слугують як простір для робітників і спостереження за процесом, а верхні 2 м займають опалубні листи. Над верхньою точкою конструкції розміщується робоча платформа, яка слугує для монтажу арматури та подачі бетонної суміші. Усі розрахунки наведено для одного погонного метра довжини модуля.

Попередньо запроєктована рама включає чотири вертикальні стійки з профілю параметрами $50 \times 30 \times 3$ мм, кожна завдовжки 4 м, а також

горизонтальні зв'язки та поперечні перемички. Сукупна маса стійок становить орієнтовно 112 кг, горизонтальних зв'язків — 14 кг, перемичок — 42 кг. Загальна маса рами дорівнює приблизно 168 кг на погонний метр довжини. Опалубні листи, які займають верхні 2 метри висоти, мають площу 2 м² на кожен метр довжини системи. Вага одного щита становить близько 47 кг. Робоча платформа включає несучу балку та настил зі сталевих листів. Загальна маса платформи орієнтовно становить 46 кг/мп. Загальна маса всієї армовидавлювальної системи складає: 168 кг (рама) + 47 кг (опалубні листи) + 46 кг (платформа) = 261 кг на погонний метр довжини (таблиця 2.4).

Таблиця 2.4 — Розрахунок ваги конструктивних елементів армовидавлювальної системи

Елемент	Маса, кг/мп
Вертикальні стійки (4 шт, 4 м кожна, 50 × 30 × 3 мм)	112
Горизонтальні зв'язки (4 шт по 1 м)	14
Поперечні перемички (6 шт по 1 м)	42
Опалубні листи (2 м ² , товщина 3 мм)	47
Несуча балка платформи (1 м, 100 × 50 × 4 мм)	15
Настил платформи (1 м ² , товщина 4 мм)	31
Загальна маса:	261

Для порівняння, класична ковзна опалубка має масу приблизно від 140 кг/мп до 170 кг/мп і включає коротшу раму, опалубні щити та механізм підйому (домкрати). Армовидавлювальна система має вищу власну масу через подвоєну висоту рами, наявність робочої платформи та сталеві щити. Це збільшує навантаження на кріплення та вантажопідйомне обладнання й потребує ретельного підбору опорної балки та системи лебідок.

Таким чином, для дослідження конструкцій, які зводяться методом гравітаційного видавлювання, було розглянуто масу 260 кг/мп.

Завершує перелік інша група факторів, що включає параметри, пов'язані з геометрією траншеї, характеристиками захисних розчинів та елементами допоміжного обладнання.

Ширина траншеї (x_{41}). Згідно з вітчизняними та міжнародними джерелами, ширина траншеї під діафрагмові (глибинні) стіни («стіна в ґрунті») зазвичай становить від 0,6 м до 1,5 м залежно від товщини стіни та діаметрів бурових інструментів [90]. Типова товщина діафрагмової стіни становить 0,8 м, а траншеї — приблизно 0,9 м (з урахуванням технологічного зазору для бурового штангового обладнання та стабілізаційного шару глинистого розчину). Для товщини 1,2 м траншея розкопу становить приблизно від 1,3 м до 1,4 м. Це вже враховує необхідний запас по ширині для втримання стінок глинистою суспензією і монтаж арматурних каркасів.

Оскільки товщина конструкції для гравітаційного видавлювання приймається в діапазоні від 0,4 м до 1,0 м, де 0,6 м — базова товщина, для дослідження було обрано ширину траншеї від 0,7 м до 1,4 м. Таку величину отримано, враховуючи, що опорна балка повинна бути на 0,1 м ширшою за саму конструкцію, а траншея — на 0,1 м ширшою за опорну балку. Така ширина забезпечує достатній простір для заповнення ущільнювальними матеріалами довкола стіни та водночас дає необхідний проміжок для монтажу опорної балки та стінової конструкції, що знижує ризик небажаних зсувів ґрунту.

Довжина захватки траншеї (x_{42}). При влаштуванні підземних конструкцій методом «стіна в ґрунті» мінімальна довжина захватки (близько 2 м) залежить від розмірів робочого органу землерийної техніки. Для глибоких траншей в умовах слабких ґрунтів доцільно збільшувати мінімальний розмір до діапазону від 2,5 м до 3 м [29]. Максимальний розмір окремої захватки може досягати від 8 м до 10 м. При застосуванні методу гравітаційного видавлювання довжина захватки бетонування повинна бути якомога більшою,

так як зменшення розміру захватки веде до збільшення вертикальних швів, що в свою чергу погіршує гідроізоляційні властивості конструкції.

Для дослідження конструкцій, які зводяться методом гравітаційного видавлювання, було розглянуто діапазон довжин захватки від 6 м до 18 м, що відповідає довжині однієї опорної балки.

Глибина траншеї (x_{43}). При влаштуванні стін в ґрунті традиційно використовують два основні типи землерийної техніки: грейфери та гідрофрези. Грейферні установки зазвичай застосовують грейферні ківші місткістю від 1 м³ до 3 м³, які дозволяють досягати глибин в межах від 15 м до 20 м за одну стадію [29]. При дуже жорстких або піщаних ґрунтах ефективна глибина обмежується діапазоном від 18 м до 20 м, оскільки далі зростають ризики обвалів і втрат глинистого шламу. Гідрофрези застосовують у ґрунтах середньої та високої міцності (суглинки, легкі суглинки з включеннями гравію, слабкі вапняки). Як наведено у таблиці 2.5, типова глибина зрізу сучасних машин (наприклад, Bauer BG 28) становить до 50 м. При цьому рихлий ґрунт або наявність скельних включень можуть знизити продуктивність, але загалом гідрофрез здатен пробурювати траншею в межах від 30 м до 40 м без необхідності попереднього розкріплення.

Нижче наведено характеристики техніки для розробки траншей при влаштуванні стін у ґрунті (таблиця 2.5).

Таблиця 2.5

Тип техніки	Модель	Об'єм ковша/ріжучої головки	Максимальна глибина траншеї
Грейфер	Caterpillar 349 GC [86]	2,5 м ³	18 м
	Liebherr R 940 Litronic [87]	3,0 м ³	20 м
Гідрофрез	Bauer BG 22 [88]	Ø1,5 м	40 м
	Soilmec RF 14 [89]	Ø1,6 м	45 м

У технології гравітаційного видавлювання траншея спочатку влаштовується під захистом глинистого розчину аналогічно до методу «стіна в ґрунті», тому межі глибини визначаються можливостями самої техніки. Якщо використовується грейфер із заповненням глинистим шламом, то траншею доцільно робити не глибше 18 м, щоб уникнути надмірних втрат розчину та запобігти обвалам. Якщо доступний гідрофрез, то можна розраховувати на глибини до 40 м, а за сприятливих інженерно-геологічних умов — навіть до 50 м.

Густина прохідницького (глинистого) розчину (x_{44}). У методі «стіна в ґрунті» густина глинистого розчину зазвичай коливається від 1,03 т/м³ до 1,10 т/м³, що забезпечує належний гідростатичний тиск для середніх глибин (приблизно від 15 м до 20 м) та ефективний захист від обвалів. За складних ґрунтових умов чи за великих глибин рекомендується збільшувати густину до 1,15 т/м³ і вище для підвищення стабільності траншеї [90-92].

Для технології гравітаційного видавлювання підвищення густини глинистого розчину має додаткову перевагу. Збільшення густини сприяє зниженню монтажної ваги зануреної конструкції завдяки дії виштовхувальної сили. Математичне моделювання показало, що за густини до 1,5 т/м³ монтажна вага конструкції зменшується на 37 % від ваги конструкції, що не занурюється в середовище розчину [93]. Тому при опусканні готової конструкції в траншею бажано використовувати розчин з максимальною досяжною густиною в межах технологічних можливостей.

Для дослідження конструкцій, які зводяться методом гравітаційного видавлювання, було розглянуто діапазон від 1,03 т/м³ до 1,5 т/м³.

Крок елементів підвішування конструкцій (x_{45}). Крок між канатами (тросами) є одним із ключових параметрів при гравітаційному видавлюванні армобетонних конструкцій, оскільки впливає на рівномірність розподілу навантаження та можливість безперешкодного монтажу арматури й ін'єкційних труб. Для дослідження конструкцій, які зводяться методом гравітаційного видавлювання, було розглянуто діапазон від 1,0 м до 2,0 м, що

дає змогу забезпечити надійну підтримку всієї довжини конструкції та водночас залишати достатньо простору для технічного обслуговування й виконання монтажних робіт. Зменшення кроку (менше ніж 1,0 м) уможливорює щільнішу підтримку, але може ускладнити доступ до внутрішньої частини опалубки та збільшити витрати на канати й точки кріплення. Якщо ж крок надто великий (більше ніж 2,0 м), то зростає ризик нерівномірного розподілу зусиль і локальних провисань, що може призвести до деформацій та порушення геометрії конструкції [94-95].

Концентрація людей, що розміщується на опалубній системі (x_{46}).

Концентрація людей на підмостках опалубної системи безпосередньо впливає на безпеку виконання робіт і ризик перевантаження майданчиків, призначених для обслуговування. У ковзній опалубці, що поступово переміщується вгору разом із робочим персоналом, підмостки зазвичай мають обмежену площу й розраховані на певну кількість працівників, необхідних для безперервного бетонування, монтажу арматури та контролю процесу. Проектна несуча здатність таких робочих настилів має витримувати навантаження не менше діапазону від 2,0 кН/м² до 3,0 кН/м² (залежно від категорії робіт і висоти конструкції). Проте людський фактор (незаплановане скупчення працівників й інструментів в одному місці) може збільшити ризик локальних перевищень проєктних значень.

У технології гравітаційного видавлювання залізобетонних конструкцій підмостки опалубної системи також використовуються для контролю процесу видавлювання, але робоча зона може бути просторішою та менш динамічною, ніж у ковзній опалубці. З іншого боку, через специфіку покрокового формування та необхідність одночасно контролювати правильність видавлювання і стан сформованої частини конструкції на підмостках іноді одночасно може перебувати декілька осіб (оператори обладнання, спеціалісти з бетонування, арматурники). Тому важливо забезпечити достатній запас міцності настилів та, за потреби, розподілити персонал між різними робочими рівнями.

Рекомендований діапазон навантаження, що формується персоналом та необхідними інструментами, зазвичай, становить від 2,0 кН/м² до 2,5 кН/м² для звичайних будівельних робіт. У разі великої кількості важких інструментів чи матеріалів доцільно передбачати підмостки з несучою здатністю до 3,0 кН/м². Контроль кількості людей на настилах особливо важливий на висотних роботах, де порушення стійкості або ушкодження підмостків можуть призвести до нещасних випадків і зупинки процесу видавлювання.

Концентрація матеріалів та механізмів і обладнання, що розміщується на опалубній системі (x_{47}). Цей параметр впливає на безпеку та зручність виконання робіт під час бетонування та формування конструкцій. У ковзній опалубці, що переміщується вгору одночасно з основними технологічними операціями, надмірна кількість вантажів (арматури, допоміжного обладнання, інструментів) може спричинити перевищення розрахункових навантажень на настили й домкрати, а також ускладнювати організацію робочих місць. Рекомендована вітчизняними будівельними стандартами несуча здатність робочих настилів ковзної опалубки зазвичай коливається в діапазоні від 2,0 кН/м до 3,0 кН/м², але на практиці необхідно враховувати додаткові запасні коефіцієнти, адже навантаження може нерівномірно розподілятися (наприклад, за рахунок локалізації важкого обладнання в одній зоні).

Для гравітаційного видавлювання залізобетонних конструкцій, хоча процес формування відбувається дещо інакше, надмірна концентрація матеріалів й обладнання також може ускладнювати доступ до ключових точок контролю й обслуговування процесу. Зокрема, на відміну від ковзної опалубки, де робочий простір рухається разом із технологічною зоною, у гравітаційному методі опалубна система переважно залишається стаціонарною, а конструкція видавлюється вертикально вниз чи вбік. Однак у місцях розміщення насосів, силових приводів і запасу арматури можливі локальні пікові навантаження на настили або раму опалубної системи. Тому завжди слід передбачати рівномірне розташування важкого обладнання та складських запасів

(наприклад, арматурних прутків, бетонних сумішей, інструментів), а також обмежувати одночасне перебування великої кількості одиниць техніки.

З урахуванням того, що гравітаційне видавлювання потребує безперервного контролю стану сформованої частини конструкції та постійного доступу до механізмів, оптимальне навантаження на опалубку має в середньому не перевищувати межі від 2,0 кН/м² до 2,5 кН/м². У разі використання важкої техніки або зберігання великого обсягу матеріалів на одному рівні доцільно передбачити підсилені опорні елементи опалубки з несучою здатністю 3,0 кН/м² і більше.

2.3 Відбір та систематизація факторів

Метод експертної оцінки, зокрема метод ранжування, застосовано для визначення найважливіших факторів, що впливають на технологію гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій. Метод ранжування полягає у впорядкуванні об'єктів (факторів) за ступенем прояву певної властивості. У цьому випадку — за ступенем впливу на продуктивність технологічного процесу. Кожен експерт, що бере участь в опитуванні, розташовує перелік факторів у порядку зростання або спаду їх значущості, присвоюючи їм ранги. У результаті опитування формується ранжований ряд — впорядкована послідовність факторів від найменш до найбільш впливового. Такий підхід дозволяє, спираючись на знання та досвід фахівців, виділити з множини досліджуваних факторів найбільш суттєві. У порівнянні з більш складними експертними процедурами метод ранжування відзначається відносною простотою, хоча й має обмеження щодо кількості об'єктів, оскільки експертам важко впорядкувати дуже довгі списки факторів. В межах цього дослідження відповідна проблема мінімізована, оскільки оцінюється 10 попередньо відібраних критичних факторів.

Експертам було запропоновано впорядкувати 10 критичних факторів за ступенем впливу на продуктивність технології: від мінімального (ранг 1) до

максимального (ранг 10). Кожен ранг можна використати тільки один раз, тобто кожен експерт фактично задає унікальну послідовність з 10 факторів. Така умова унеможлиблює ситуацію рівної оцінки різних факторів одним експертом та сприяє більш чіткому порівнянню. Опитування проводилося серед 12 галузевих експертів, які обізнані з традиційними технологіями влаштування підземних споруд. Анкета містила опис мети дослідження та перелік визначених критичних факторів, які потрібно було ранжувати за впливом на продуктивність (рисунок 2.9).

Оцінювання факторів впливу

...

Сітка прапорців

Завдання:
Оцініть кожен із наведених факторів, проставивши **унікальну оцінку від 1 до 10**, де:

- 1 — **найменший вплив** на продуктивність,
- 10 — **найбільший вплив**.

Умови:

- Кожну оцінку можна використати **лише один раз**.
- Жоден бал не повинен повторюватися — у кожному стовпчику (оцінці) має бути вибраний **тільки один фактор**.

Критерій оцінки:
♦ Продуктивність влаштування армобетонної конструкції методом гравітаційного видавлювання.

Порада: спершу подумайте над впливом кожного фактору, а потім виставіть оцінки в порядку зростання важливості — від 1 до 10.

Примітка: Щоб поставити оцінку "1" (найменший вплив), будь ласка, **пересуньте повзунок (смужку прокрутки) внизу таблиці праворуч**, доки не побачите крайній стовпчик з цифрою 1.

Рядки		Стовпці	
1. Об'єм конструкції	×	☐ 10	×
2. Маса арматурного каркасу	×	☐ 9	×
3. Ширина конструкції	×	☐ 8	×
4. Рухливість бетонної суміші	×	☐ 7	×
5. Час початку тужавлення бетону	×	☐ 6	×
6. Час набирання розпалубної міцності	×	☐ 5	×
7. Густина глинистого розчину	×	☐ 4	×
8. Нахил опалубних щитів	×	☐ 3	×
9. Адгезія опалубних щитів до бетону	×	☐ 2	×
10. Глибина траншеї	×	☐ 1	×
11. Додати рядок		☐ Додати стовпець	

Рисунок 2.9 — Приклад формулювання питання для експертного ранжування впливових факторів (фрагмент анкети)

Зокрема, це геометричні параметри конструкції та захватки, характеристики системи ковзної опалубки та середовища занурення, а також

властивості бетонної суміші, глибина траншеї, довжина захватки, форма зерен заповнювачів, розмір опалубних щитів, густина глинистого розчину, висота конструкції, ширина траншеї, маса системи гравітаційного видавлювання, довжина конструкції та гранулометричний склад заповнювачів. Саме ці 10 факторів було визначено на попередніх етапах дослідження як найбільш критичні для даної технології.

Зведені результати експертного ранжування оброблено за методом середніх рангів [96]. Для кожного фактору підсумовано присвоєні всіма експертами ранги, після чого сума поділена на кількість експертів. Таким чином отримано середній ранг фактору. Чим вищим є середній ранг (ближчим до 10), тим більш впливовим група експертів вважає відповідний фактор. І навпаки, нижчі середні ранги (ближче до 1) свідчать про меншу значущість фактору в загальному оцінюванні. За отриманими даними побудовано впорядкований ряд факторів за спаданням впливовості. Так, найбільші середні бали (приблизно від 8 до 9 із 10 можливих) отримали фактори глибина траншеї, довжина захватки, форма зерен заповнювачів та розмір опалубних щитів. Це означає, що більшість експертів оцінила їх як найкритичніші, тому зазначені фактори переважно потрапляли до верхніх позицій (ранги від 8 до 10). Зокрема, фактор глибини траншеї майже однотайно отримав максимальні оцінки впливу: понад половина експертів присвоїла йому ранг 10 (найвищий), а решта — ранги 8 чи 9 (рисунок 2.10).

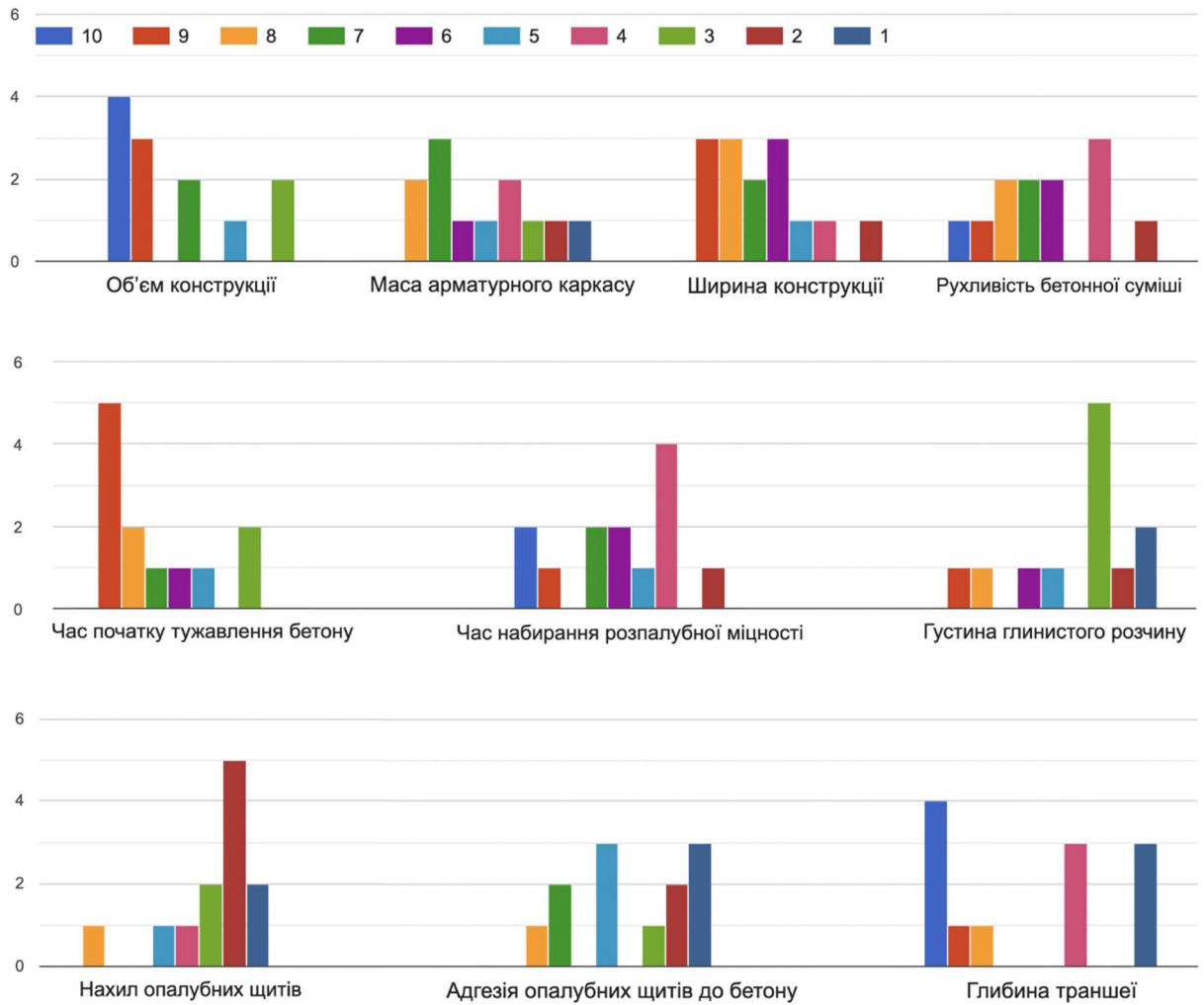


Рисунок 2.10 — Експертна оцінка критичних факторів впливу

Фактор довжини захватки у більшості випадків входив до трійки найбільш впливових. Високі середні ранги фактору форми зерен заповнювачів підтверджують важливість реологічних властивостей бетонної суміші. Експерти відзначили, що використання округлих зерен наповнювача помітно підвищує рухливість суміші та темпи бетонування, прискорюючи процес. Фактор розміру опалубних щитів також отримав високі оцінки — його середній ранг перевищує 8. Експерти погоджуються, що збільшення габаритів щитів ковзної опалубки дозволяє підвищити швидкість виготовлення конструкцій.

Менш значущими, за результатами опитування, виявилися такі фактори, як маса системи гравітаційного видавлювання, довжина конструкції та

гранулометричний склад заповнювачів. Їхні середні ранги знаходяться на рівні від 3 до 4 — найнижчий показник серед розглянутих факторів. Це свідчить про відносний консенсус експертів щодо того, що варіації цих параметрів не критично впливають на продуктивність технології (наприклад, довжина всієї конструкції більше визначає загальний обсяг робіт, ніж продуктивність виконання одиначної операції, а масу обладнання можна компенсувати налаштуванням противаг тощо). Гранулометричний склад заповнювачів (співвідношення дрібних і крупних фракцій) хоча і впливає на щільність та водоцементне відношення бетонної суміші, та посідає останнє місце в рейтингу. Очевидно через опосередкований характер його впливу на швидкість будівельного процесу. Решта факторів займають проміжні позиції: зокрема, висота конструкції та густина глинистого розчину отримали середні ранги близько 6, а ширина траншеї — близько 5 (рисунк 2.10). Таким чином, усі 12 експертів дійшли згоди, що геометричні параметри глибини і захватки, характеристики опалубної системи та форма зерен заповнювачів є домінуючими факторами впливу на продуктивність, тоді як інші фактори мають менш визначальний ефект.

Для перевірки узгодженості думок експертів обчислено коефіцієнт конкордації Кендалла W , який визначається за формулою:

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}, \quad (2.3)$$

де S — сума квадратів відхилень сум рангів по кожному об'єкту від середнього значення суми рангів;

m — кількість експертів;

n — кількість об'єктів, які ранжуються.

Значення цього коефіцієнта лежить у межах від 0 до 1: що вища узгодженість ранжувань, то ближчим є W до 1 [97]. У даному випадку отримано коефіцієнт конкордації W приблизно 0.88, що вказує на високий

ступінь узгодженості експертних оцінок. Отже, впливові фактори визначені надійно, оскільки різні експерти дійшли подібних висновків щодо їх рангового положення.

Статистична значущість такого рівня конкордації підтверджується критерієм Пірсона, який визначається за формулою:

$$\chi^2 = m(n - 1)W. \quad (2.4)$$

Для $m = 12$ експертів і $n = 10$ об'єктів розраховане значення χ^2 перевищує табличне при $p = 0.05$, що дозволяє відхилити нульову гіпотезу про випадковість розбіжностей у ранжуваннях. Отже, можна стверджувати, що група експертів сформувала узгоджену думку.

Отже, застосування методу експертного ранжування дозволило сформувати впорядкований список найбільш впливових факторів технології гравітаційного видавлювання армобетону. Отримані результати експертизи підтвердили гіпотези попередніх етапів дослідження щодо критичності окремих параметрів. Найбільший внесок у продуктивність мають геометричні та технологічні фактори процесу, а саме глибина і масштаб підземної конструкції, розміри опалубного обладнання та реологічні властивості бетонної суміші. Встановлено, що оптимізація саме цих параметрів є першочерговою для підвищення ефективності технології. Фактори, що отримали найнижчі оцінки, такі як гранулометричний склад наповнювачів або загальна довжина конструкції, можуть розглядатися як другорядні, оскільки їх варіація менш суттєво впливає на швидкість виконання робіт. Таким чином, метод експертної оцінки дозволив обґрунтовано відібрати з-поміж множини чинників ключові фактори, на яких слід зосередити подальше дослідження та удосконалення технології.

2.4 Моделювання процесу влаштування стін в ґрунті за методом гравітаційного формування

Метод гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій є інноваційною технологією, що поєднує переваги методів «стіна в ґрунті» та «ковзної опалубки». Такий підхід дозволяє зводити монолітні підземні споруди в складних умовах, забезпечуючи високу якість бетону та водонепроникність конструкцій. Заразом, комплексність цієї технології зумовлює необхідність ретельного аналізу і логіко-структурного моделювання процесу.

Для поглибленого аналізу критичної фази виготовлення конструкції було розроблено деталізовану структуру, яка відображає логіку бетонно-монтажних процесів (рисунок 2.11).

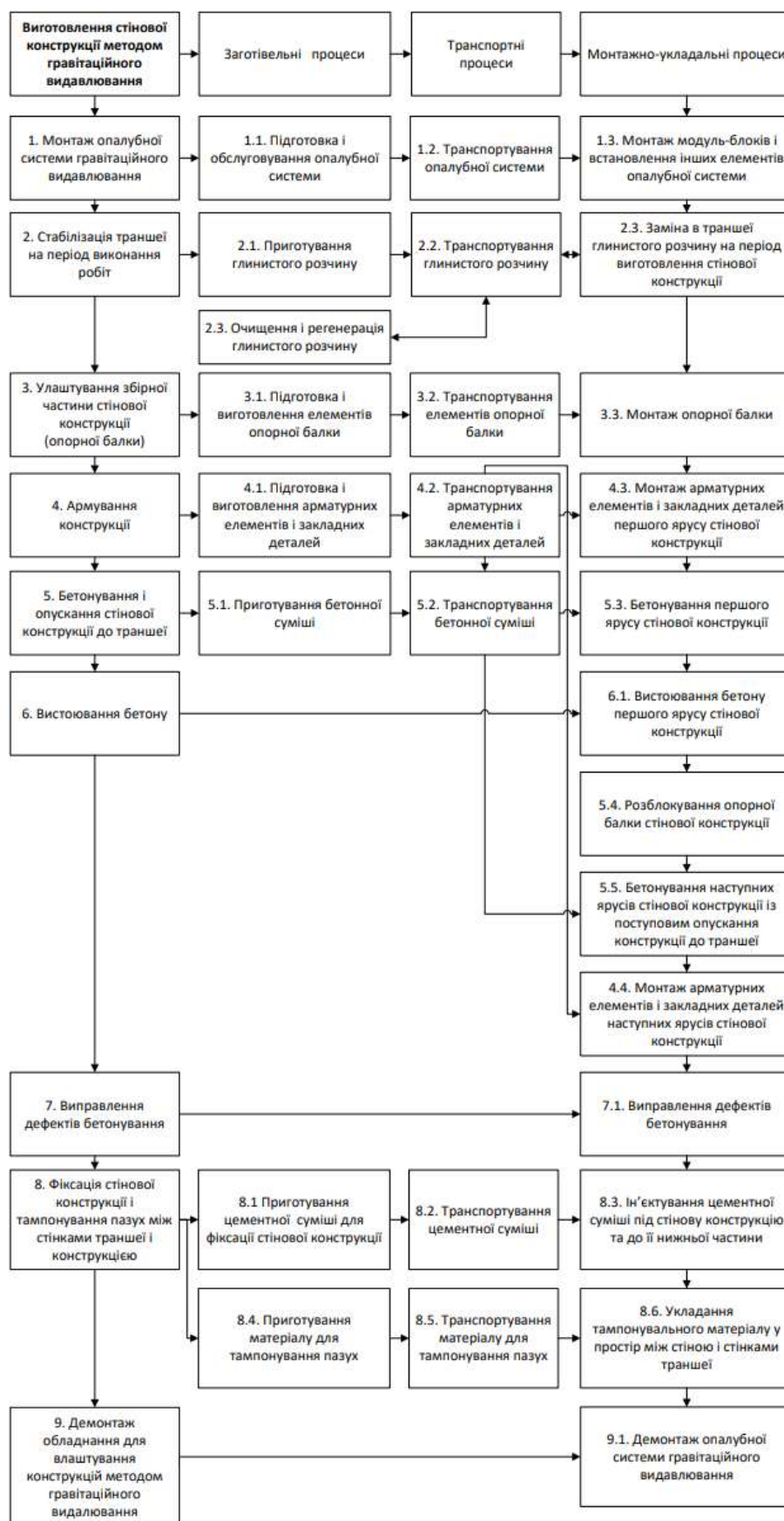


Рисунок 2.11 — Структура бетонно-монтажних процесів виготовлення підземної конструкції методом гравітаційного видавлювання

У цій структурі відображено алгоритм чергування операцій під час основного етапу: після укладання та ущільнення чергового шару бетонної суміші відбувається технологічна пауза на витримку до набору необхідної міцності бетону. Далі виконується розблокування гальмуючих пристроїв та опускання конструкції на задану величину. Одночасно здійснюється нарощування (надбудова) арматурного каркасу наступного ярусу та продовжується укладання бетонної суміші. Таким чином, модель відображає циклічний характер процесу, а саме бетонування — витримка — опускання, який повторюється до досягнення конструкцією проєктної позначки. Після завершення останнього циклу опускання відбувається заключне бетонування нижньої частини споруди (через ін'єкційну трубу подається розчин для формування основи) та припинення подальшого занурення конструкції. Приведена у рисунку модель дозволяє відстежити критичні моменти і переконатися у безперервності та керованості процесу. Всі операції синхронізовані в часі, а використання глинистого розчину і гальмівних пристроїв забезпечує контрольоване опускання без перерв у подачі бетонної суміші. Наведена модель служить основою для оцінювання параметрів бетонування й опускання та для подальшого вдосконалення технології.

Висновки до другого розділу

1. Визначено методичну основу подальших досліджень, яка базується на системному аналізі факторів, що впливають на ефективність технології гравітаційного видавлювання. Зібрано, проаналізовано та систематизовано 27 факторів впливу, що охоплюють конструктивні параметри конструкції, параметри бетонної суміші, конструктивні параметри модуль-форм опалубної системи, та інші фактори, що впливають на техніко-економічні показники технології.

2. Визначено раціональні межі розпалубної міцності бетонної суміші в момент подальшого переміщення першого ярусу: від 0,5 МПа до 1,5 МПа, що дозволяє забезпечити безпечне ущільнення та збереження геометрії. Параметри ущільнення встановлено в межах від 25 с/м³ до 35 с/м³, інтенсивність подачі бетонної суміші — від 12 м³/год до 20 м³/год, що узгоджується з темпами виготовлення конструкції.

3. Із загального переліку було відібрано 10 критичних факторів, які потенційно мають найсуттєвіший вплив на продуктивність технології. Ці фактори було передано на експертне оцінювання, у якому взяли участь фахівці в галузі підземного та спеціального будівництва. Встановлено, що в умовах перевищення допустимої тривалості витримки відкритої траншеї без подачі бетонної суміші спостерігається деградація тиксотропних властивостей глинистого розчину, зменшення несучої здатності та ризик руйнування стінок. Узагальнено основні технологічні параметри процесу гравітаційного видавлювання, включаючи швидкість занурення, подачу суміші, час витримки, густину армування, параметри тиксотропного розчину та геометрію конструкції. На їх основі створено передумови для розроблення повноцінної методики проєктування нової технології.

4. Було розроблено блок-схему бетонно-монтажних процесів виготовлення підземної конструкції методом гравітаційного видавлювання, яка відображає послідовність, взаємозв'язки та взаємозалежність основних етапів: від підготовки опалубної системи до демонтажу обладнання після завершення формування конструкції. Структура схеми дозволяє цілісно представити технологічний цикл і забезпечити наочність для подальшого аналізу, оптимізації та впровадження технології у виробничу практику.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРУДОМІСТКОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ВЛАШТУВАННЯ СТІН ЗА МЕТОДОМ ГРАВІТАЦІЙНОГО ФОРМУВАННЯ

3.1 Дослідження тривалості та продуктивності виготовлення вертикальних стінових конструкцій методом гравітаційного видавлювання

Виготовлення стінових конструкцій методом гравітаційного видавлювання можливе за умови, коли тривалість виготовлення конструкції не перевищує тривалості стійкості стінок попередньо викопаної траншеї, що можна описати наступною математичною моделлю:

$$\sum_{i=1}^n t_i < T_{\text{ст.тр.}}, \quad (3.1)$$

де $\sum_{i=1}^n t_i$ — тривалість технологічного процесу виготовлення стінової конструкції методом гравітаційного видавлювання, що являє собою суму тривалостей виконання окремих складових робочих операцій в межах окремого технологічного циклу;

$T_{\text{ст.тр.}}$ — гранична тривалість стійкості стінок траншеї.

Загалом $T_{\text{ст.тр.}}$ залежить від багатьох чинників, зокрема від густини глинистої суспензії, швидкості фільтрації рідини в ґрунтах, глибини траншеї та її геометрії. Водночас, математичне моделювання показує, що вирішальний внесок у сумарну тривалість технології здійснюють саме етапи виготовлення конструкції після завершення розробки траншеї [98-99].

$$T = \sum_{i=1}^{l=14} t_i + \sum_{j=1}^{J=n} t_j^{\text{п}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_1^{\text{п}} + t_9 + t_{10} + t_{11} + t_{12} + t_{13} + t_{14}, \quad (3.2)$$

де t_1 — тривалість влаштування піонерної траншеї по контуру будівлі;

t_2 — тривалість монтажу конструкцій форшахти;

t_3 — тривалість буріння піонерних свердловин для розташування ківшу грейфера;

t_4 — тривалість викопування траншеї із видаленням ґрунту за допомогою грейфера з одночасним її заповненням глинистою суспензією оптимальної густини, та в процесі копання виконується рециркуляція глинистого розчину;

t_5 — тривалість очищення траншеї та заміна глинистого розчину на глинистий розчин більшої густини;

t_6 — тривалість монтажу системи гравітаційного видавлювання;

t_7 — тривалість встановлення опорних балок;

t_8 — тривалість бетонування першого ярусу конструкції із встановленням арматурного каркасу;

$t_1^{\text{п}}$ — тривалість технологічної перерви на набирання проєктної технологічної міцності бетону першого ярусу;

t_9 — тривалість розблокування опорної балки конструкції;

t_{10} — тривалість безперервного бетонування наступних ярусів конструкції із встановленням арматурного каркасу;

t_{11} — тривалість фіксації конструкції в її проєктному положенні до повного тверднення бетону;

t_{12} — тривалість заповнення простору між конструкцією і стінками траншеї тампонажним матеріалом (щебінь, гравій);

t_{13} — тривалість демонтажу системи гравітаційного видавлювання;

t_{14} — тривалість демонтажу елементів збірної форшахти.

Таким чином, метою є детальне дослідження тривалості технологічних етапів t_6 , t_7 , t_8 , t_9 , t_{10} та t_{11} як критичних для реалізації безперервного та безпечного процесу гравітаційного видавлювання зі збереженням умови стійкості траншеї:

$$(t_6 + t_7 + t_8 + t_1^{\text{п}} + t_9 + t_{10} + t_{11}) \leq T_{\text{ст.тр.}} \quad (3.3)$$

Здійснення такого аналізу дозволяє не лише перевірити відповідність запропонованої технології межам стійкості траншеї, але й створює підґрунтя для подальшої оптимізації процесу.

Етап t_6 — монтаж системи гравітаційного видавлювання. Система гравітаційного видавлювання монтується вздовж країв траншеї (на елементах форшахти) і формує вертикальний канал, який слугує ковзною опалубкою для бетонування стінки. Конструкція системи включає направляючі рейки для фіксації опалубних щитів для виготовлення майбутньої стінки без відхилень. Також передбачено спеціальну оглядову зону під опалубними листами для контролю якості свіжого бетону та робочу платформу нагорі для подачі арматури й бетонної суміші.

Тривалість монтажу системи гравітаційного видавлювання залежить від периметру (довжини) ділянки траншеї, що оснащується, а також від конструкції та маси елементів системи (щити опалубки, напрямні, платформи) і продуктивності монтажної бригади. Орієнтовно цей час можна визначити за залежністю:

$$t_6 = \frac{L_{\text{тр}}}{V_{\text{мон}}}, \quad (3.4)$$

де $L_{\text{тр}}$ — довжина секції траншеї, на якій монтується система;

$V_{\text{мон}}$ — середня швидкість монтажу системи (м/год), що враховує встановлення модуль-форми з двох боків траншеї та платформи.

Залежність 3.4 передбачає, що роботи виконуються паралельно вздовж секції траншеї (двома бригадами на протилежних бортах). Якщо система встановлюється на всю довжину стінки котловану одночасно, то $L_{\text{тр}}$ відповідає довжині стінки (сторони котловану). Типове значення швидкості $V_{\text{мон}}$ при використанні крана та болтового кріплення щитів може становити приблизно від 1,5 м до 2,0 м опалубки за годину на бригаду (рисунок 3.1). У цю тривалість

входить встановлення та вирівнювання всіх елементів системи, що забезпечують наступне безперервне бетонування [100-101].

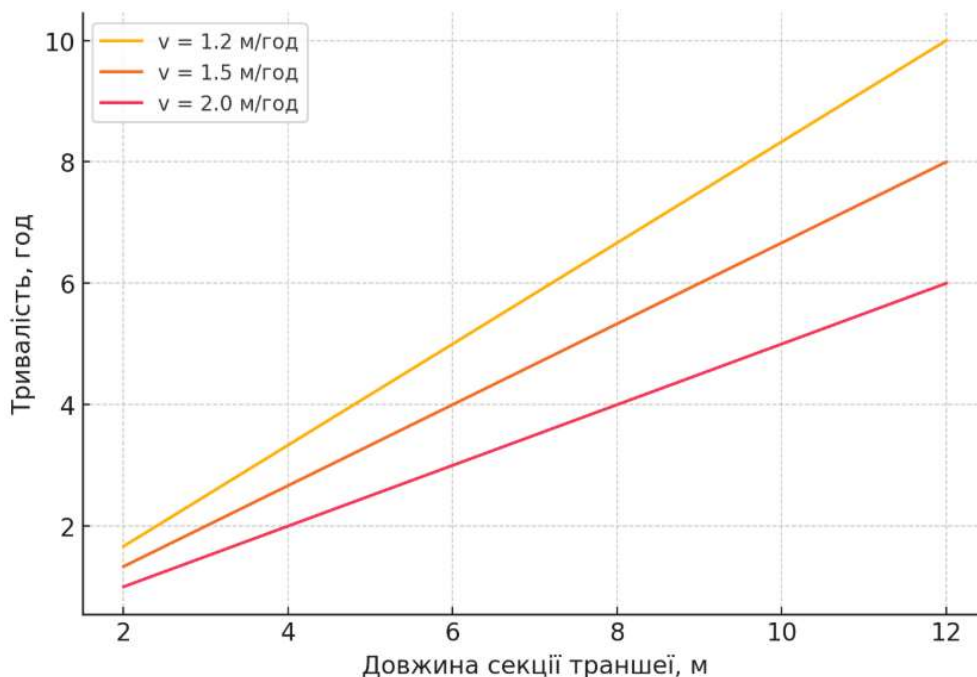


Рисунок 3.1 — Тривалість монтажу системи гравітаційного видавлювання

Етап t_7 — встановлення опорних балок. Після монтажу опалубної системи на дно вертикального каналу (в межах ковзної опалубки) встановлюється опорна балка — основа для формування першого ярусу бетонної конструкції. Балка кріпиться під нижнім краєм опалубних щитів і тимчасово фіксується спеціальними упорами (фіксаторами). Це необхідно для того, щоб балка витримувала навантаження свіжоукладеного бетону першого ярусу, не зміщуючись до набору бетоном мінімальної міцності. Цей етап передбачає всі роботи з монтажу опорної балки (балок) та її (їх) закріплення. Якщо периметр конструкції замкнутий, такі опори можуть встановлюватися на кожній стороні котловану або секції стінки, що виготовляється.

Тривалість можна оцінити за числом опорних елементів і трудомісткістю їх встановлення. Якщо передбачається одна балка на секцію, час визначається в основному її монтажем краном та фіксацією. Відповідно:

$$t_7 = N_{\text{бал}} * t_{\text{бал}} , \quad (3.5)$$

де $N_{\text{бал}}$ — кількість опорних балок, що встановлюються одночасно;

$t_{\text{бал}}$ — середній час монтажу та закріплення однієї балки (год).

Типовий сценарій: установка сталевих двотаврових балок під отвір ковзної опалубки краном та заклинювання її упорами може тривати близько 1 години. Якщо ж монтується декілька балок (наприклад, по одній на кожен секцію котловану) паралельно різними бригадами, то $N_{\text{бал}}$ дорівнює числу сторін (4 для прямокутного контуру), і за наявності декількох кранів роботи можуть виконуватися одночасно. У такому разі оцінка t_7 базується на найтривалішій операції (критичний шлях). Для однієї секції траншеї (довжиною від 6 м до 18 м) зазвичай достатньо однієї опорної балки, тому надалі можна прийняти t_7 приблизно за 1 годину.

Етап t_8 — бетонування першого ярусу з армуванням. Після встановлення опори проводиться бетонування початкової частини конструкції — першого ярусу. На опорну балку в межах ковзної опалубки укладається арматурний каркас і бетонна суміш. Формується монолітний фрагмент стінки певної висоти (перший ярус), що слугує основою для наступного безперервного нарощування конструкції. Після влаштування (укладання) бетонної суміші опалубка утримує її до початкового тверднення. Опорна балка з упорами бере на себе вагу бетону. Процес завершується, коли перший ярус бетону покладено та належним чином ущільнено [55-57].

Час, необхідний на виконання бетонування першого ярусу, залежить від обсягу бетонної суміші та кількості чи складності арматури. Повна тривалість цього етапу складається з часу на встановлення та закріплення арматурного каркасу $t_{\text{арм}}$ і часу на укладання й ущільнення бетонної суміші $t_{\text{бет}}$. Відповідно:

$$t_8 = t_{\text{арм}} + t_{\text{бет}} = \frac{M_{\text{арм}}}{P_{\text{арм}}} + \frac{V_{\text{бет}}}{Q_{\text{бет}}}, \quad (3.6)$$

де $M_{\text{арм}}$ — маса чи об'єм арматури в першому ярусі;

$P_{\text{арм}}$ — продуктивність монтажу арматури (кг/год або т/год);

$V_{\text{бет}}$ — об'єм бетону, укладеного в першому ярусі;

$Q_{\text{бет}}$ — продуктивність бетонування ($\text{м}^3/\text{год}$).

На практиці цей етап є відносно коротким, оскільки об'єм першого ярусу невеликий (його висоту прагнуть мінімізувати для зменшення тривалості технологічної перерви). Наприклад, при стандартних розмірах першого ярусу ($h = 2 \text{ м}$, $b = 0.6 \text{ м}$, $L = 6 \text{ м}$) з використанням бадді для подачі розчину з продуктивністю $4 \text{ м}^3/\text{год}$ укладання цього об'єму триватиме приблизно 1.8 годин. Армування першого ярусу може здійснюватися шляхом попереднього в'язання каркасу та швидкого його опускання краном в траншею. Якщо каркас заздалегідь виготовлений, то час на його встановлення мінімальний (близько 0.5 годин). Отже, сумарно 2 години, враховуючи можливі затримки на вирівнювання арматури та контроль якості бетонування.

Технологічна перерва $t_1^{\text{п}}$. Після укладання бетону першого ярусу необхідно витримати паузу, щоб бетон набрав достатню початкову міцність перед наступними операціями. Ця технологічна перерва триває до досягнення бетоном так званої проєктної технологічної міцності, тобто мінімальної міцності, потрібної для продовження бетонування та початку переміщення конструкції [58]. Під час перерви опалубка та опорна балка продовжують підтримувати перший ярус, а бетон твердне у спокої. Тривалість перерви залежить від рецептури бетону, умов тверднення (температура, вологість) та необхідної межі міцності. Орієнтовно для звичайного портландцементу при $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ бетон набирає приблизно від 30 % до 40 % міцності за першу добу (таблиця 3.1), досягаючи від 5 МПа до 10 МПа, що може бути достатнім для продовження робіт (рисунок 3.2) [77].

Таблиця 3.1 — Набір міцності бетону С25/30 (В30) при різних температурних умовах навколишнього середовища

Доба	Міцність, Мпа	Проектна, Мпа	% міцності від проектної
від +10 °С до +30 °С			
1	9,81	27,25	30
3	19,62		60
7	22,89		70
14	29,43		90
28	35,97		110
від +5 °С до +25 °С			
1	8,18	27,25	25
3	17,99		55
7	21,26		65
14	27,8		85
28	34,34		105
від 0 °С до +5 °С			
1	0,65	27,25	2
3	13,08		40
7	19,62		60
14	24,53		75
28	31,07		95

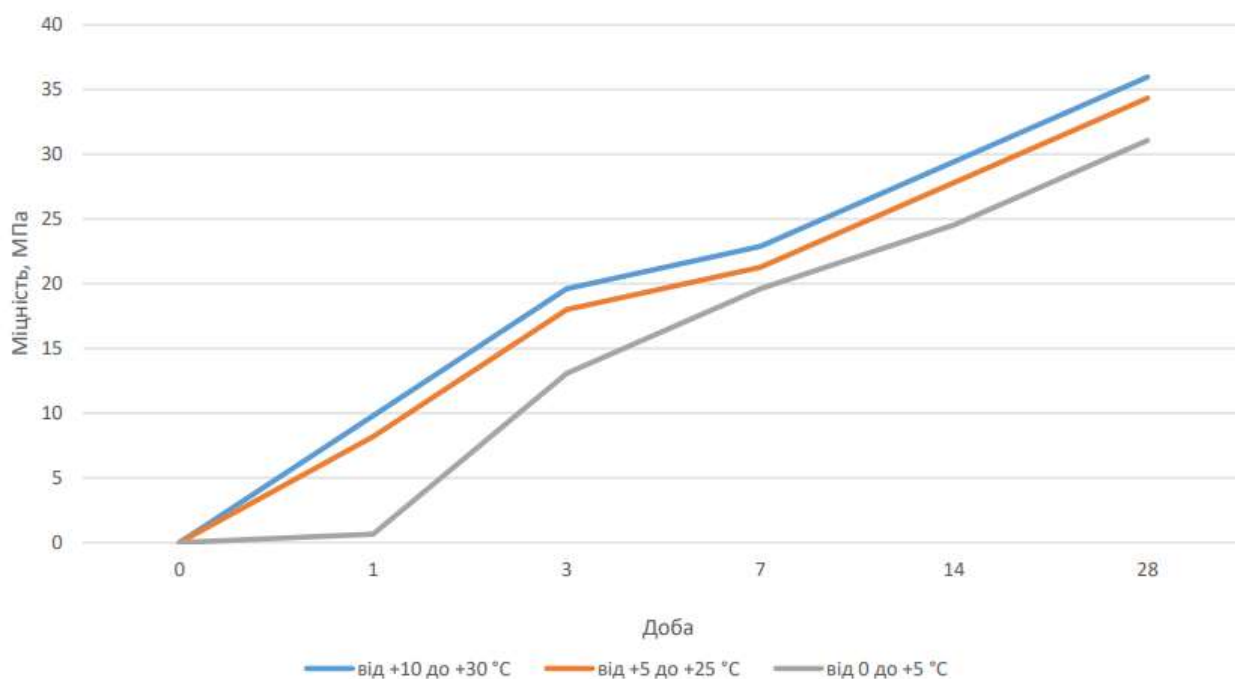


Рисунок 3.2 — Графік набору міцності бетону C25/30 (B30) при різних температурних умовах навколишнього середовища

Використання прискорювачів тверднення, високомарочного цементу або прогрівання може скоротити цю паузу до діапазону від 8 до 12 годин. У подальших розрахунках $t_1^п$ приймається приблизно за 12 годин (наприклад, витримка протягом ночі), якщо не зазначено інше. За цей час бетон першого ярусу досягне початкової міцності, достатньої для розблокування опор.

Вже за 6 годин бетон набирає приблизно від 30 % до 35 % від 28-добової міцності. У цей період поверхня суміші перебуває в «робочій» фазі, тобто вона достатньо загусла, щоб не деформуватися під власною вагою чи зовнішніми впливами, але ще не сформувала міцного захисного «коркового» шару. Саме ця «робоча свіжість» є ключовою для забезпечення надійного зчеплення між першим шаром та наступним шаром бетонування у методі гравітаційного видавлювання. Якщо додавати нову суміш протягом цього інтервалу (в діапазоні від 10 до 12 годин), то свіжий бетон зливається з раніше висипаним без утворення капілярних «швів», тобто перехід залишається монолітним.

Приблизно на позначці 12 годин бетон досягає від 40 % до 45 % від проєктної міцності. Після цієї точки починається інтенсивніше формування

твердого каркаса кристалів гідратів, і зовнішній шар суміші дедалі гірше сприймає додавання нового бетону. Поява капілярних зон, що не поєднуються між собою, призводить до утворення слабших горизонтальних швів. Отже, саме до 12 годин варто завершити весь процес перехресного нарощування стінки, щоб забезпечити максимальну зв'язність між шарами (рисунок 3.3).

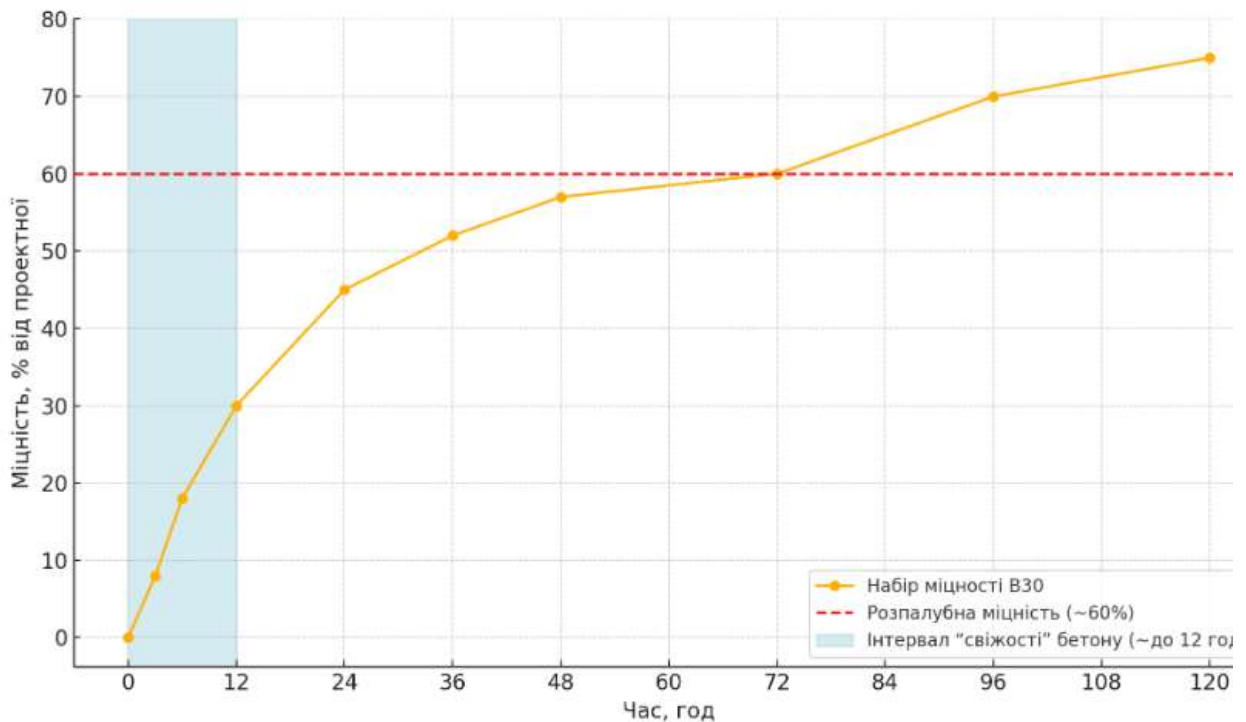


Рисунок 3.3 — Графік набору міцності бетону марки C25/30 (B30) у %

На графіку також чітко позначено точку, коли бетон долає 60 % від марочної витримки. Ця межа (приблизно від 24 до 36 годин від початку тужавіння, залежно від температури й способу догляду) відповідає моменту, коли бетон уже має достатню швидкоплинну міцність.

Таким чином, аналіз графіку показує, що оптимальне вікно для переходу від першого шару до безперервного монолітного видавлювання розпочинається приблизно через 6 годин (коли бетон уже здатен витримувати власну вагу та легкі навантаження) і триває до 12 годин (поки верхній шар залишається свіжим для надійного бетонного зчеплення).

Етап t_9 — розблокування опорної балки. Після витримки, коли бетон першого ярусу набув необхідної міцності, опорна балка звільняється від

фіксаторів, що утримували її нерухомо. Зняття упорів означає, що більше немає жорсткого кріплення конструкції до берм траншеї, тобто щойно створений фрагмент стінки (перший ярус разом з опорною балкою) отримує можливість рухатися вертикально вниз під дією власної ваги та контролю опускання за допомогою лебідок. Таким чином, етап t_9 є відносно короткочасним і переходить безперервно до наступного процесу — власне гравітаційного видавлювання (екструзії) стінки вниз.

Тривалість t_9 загалом визначається часом на демонтаж (відкручування або вилучення) фіксуючих елементів і запуск механізму опускання. Відповідно її можна виразити через кількість фіксаторів $N_{\text{фікс}}$ і середній час вилучення одного фіксатора:

$$t_9 = N_{\text{фікс}} * t_{\text{фікс}}, \quad (3.7)$$

де $t_{\text{фікс}}$ — час на зняття одного упора (години).

Враховуючи аналогічні норми ЄНіР для демонтажу балкових й опалубних систем [102], час на етап t_9 може становити від 1,2 людино-години до 1,8 людино-години на одну захватку за участі 2 осіб, тобто до 0,9 людино-год/людину. Загальний технологічний час — від 20 хв до 40 хв, що підтверджується практикою монтажу знімних фіксаторів у важких щитових опалубках.

Надалі приймаємо, що t_9 становить приблизно одну години або менше, оскільки операція нескладна та може бути виконана швидко кількома робітниками одночасно.

Етап t_{10} — безперервне бетонування наступних ярусів. Цей етап є основним у технології гравітаційного видавлювання. Одразу після розблокування опори вся конструкція першого ярусу починає опускатися в траншею під власною вагою, контрольованою лебідками. В процесі опускання працівники нарощують випуски арматури й укладають нові шари бетонної суміші у ковзну опалубку зверху. Бетонування ведеться шарами з відповідним

ущільненням, завдяки чому утворюється безшовна монолітна стіна без горизонтальних робочих швів. Контроль стану свіжого бетону здійснюється через оглядові вікна під опалубними листами, що дозволяє вчасно виявляти й усувати дефекти. Таким чином, поки конструкція повільно опускається, зверху безперервно додається новий бетон й арматура, тобто йде процес екструзії стінки вниз у ґрунт.

Тривалість безперервного бетонування наступних ярусів конструкції буде становити:

$$t_{10} = \frac{(h_{\text{ст}} - h_{\text{яр}})l_{\text{ст}}b_{\text{ст}}}{I_6} + t_{\text{орг}}, \quad (3.8)$$

де $h_{\text{ст}}$ — висота монолітної частини стінової конструкції;

$h_{\text{яр}}$ — висота першого ярусу бетонування;

$l_{\text{ст}}$ — периметр стінових конструкцій (для замкнутих форм), або довжина захватки бетонування;

$b_{\text{ст}}$ — ширина стінової конструкції;

I_6 — інтенсивність укладання бетонної суміші у модуль-форму;

$t_{\text{орг}}$ — сумарна тривалість організаційних перерв, що виникають внаслідок порушення ритмічності процесу.

Інтенсивність укладання бетонної суміші у модуль-форму повинна відповідати наступній умові:

$$I_6^{\min} \leq I_6 \leq I_6^{\max}, \quad (3.9)$$

де $I_6^{\min}$ — мінімально допустима інтенсивність укладання бетонної суміші у модуль-форму;

$I_6^{\max}$ — максимально допустима інтенсивність укладання бетонної суміші у модуль-форму.

Мінімальну інтенсивність укладання бетонної суміші у модуль-форму визначаємо за допомогою умови забезпечення монолітності стінової конструкції:

$$I_6^{min} = \frac{h_{ш} l_{ст} b_{ст}}{t_{п.т.} - t_{тр}}, \quad (3.10)$$

де $h_{ш}$ — висота шару укладання бетонної суміші до модуль-форми;

$t_{п.т.}$ — термін початку тужавіння бетонної суміші;

$t_{тр}$ — тривалість транспортування бетонної суміші.

Ця умова гарантує, що новий шар бетонної суміші не затримується у формі довше, ніж потрібно для початку процесу тужавіння, і тим самим забезпечується монолітність стінової частини.

Максимальну інтенсивність укладання бетонної суміші у модуль-форму визначаємо за допомогою умови забезпечення ковзання затверділого бетону по поверхні палуби:

$$I_6^{max} = \frac{(h_{оп} - h_{ук} - h_{м}) l_{ст} b_{ст}}{t_{ков} - t_{тр}}, \quad (3.11)$$

де $h_{оп}$ — висота палуби модуль-форми;

$h_{ук}$ — висота укладеного бетону попереднього ярусу до модуль-форми;

$h_{м}$ — технологічно необхідна мінімальна відстань від верхньої поверхні укладеної бетонної суміші до верхньої грані палуби;

$t_{ков}$ — термін набирання максимальної міцності бетоном, при якій відсутнє зчеплення з поверхнею палуби (забезпечується ковзання), тобто від 0,147 МПа до 0,196 МПа.

Інтенсивність укладання бетонної суміші у модуль-форму при застосуванні бетононасосів буде становити:

$$I_6 = \frac{h_{ш} l_{ст} b_{ст}}{t_{ц}} = \frac{h_{ш} l_{ст} b_{ст}}{t_{пр}^{б} + t_{ущ}^{б}}, \quad (3.12)$$

де $t_{ц}^{б}$ — тривалість циклу укладання бетонної суміші до модуль-форми;

$t_{\text{пр}}^6$ — тривалість приймання і розподілення окремого шару бетонної суміші;

$t_{\text{ущ}}^6$ — тривалість ущільнення окремого шару бетонної суміші.

При цьому мінімальну кількість вібраторів для ущільнення бетонної суміші визначають наступним чином:

$$N_{\text{віб}}^{\text{min}} = \frac{I_6}{\Pi_{\text{віб}}}, \quad (3.13)$$

де $\Pi_{\text{віб}}$ — експлуатаційна продуктивність окремого вібратора.

Для забезпечення ритмічності процесу укладання бетонної суміші необхідно, щоб виконувалась умова:

$$\frac{(h_{\text{ст}} - h_{\text{яр}})l_{\text{ст}}b_{\text{ст}}}{I_6} \leq \frac{(t_{\text{арм}} + t_{\text{ін}})h_{\text{ш}}}{h_{\text{ст}}} + \sum t_{\text{деф},i}, \quad (3.14)$$

де $t_{\text{арм}}$ — тривалість армування і встановлення закладних деталей одного ярусу конструкції, що виготовляється методом гравітаційного видавлювання;

$t_{\text{ін}}$ — тривалість підрозування каналів для ін'єктування бетонної суміші і виконання інших супутніх операцій;

$\sum t_{\text{деф},i}$ — сумарна тривалість виправлення дефектів роботи модуль-форми при укладанні бетонної суміші.

Згідно з розробленою моделлю, тривалість етапу t_{10} безперервного бетонування визначається двома основними складовими: часом безпосередньої подачі та ущільнення бетонної маси і сумарними організаційними перервами. Перша складова прямо пропорційна об'єму монолітного бетону, що підлягає укладанню. Тому, коли $h_{\text{ст}}$ або $l_{\text{ст}}$ суттєво зростають, а $b_{\text{ст}}$ залишається сталим, то загальний обсяг робіт збільшується, що пропорційно подовжує час роботи. І навпаки, нарощення товщини стінки з урахуванням тієї самої довжини периметра призводить до зменшення швидкості опускання, оскільки об'єм бетону (при незмінному периметрі)

розподіляється по більшій товщині, а, отже, відносна висота стінки знижується.

Інтенсивність I_6 , у свою чергу, обмежується технологічними рамками. Вона не може бути меншою за мінімальну величину, необхідну для забезпечення монолітності шару (I_6^{min}), і не може перевищувати максимально допустимий рівень, при якому попередні шари вже досить затвердіють для ковзання по опалубці (I_6^{max}). Отже, навіть за умови інтенсивного нагнітання бетонної суміші обладнанням підвищення I_6^{min} вище I_6^{max} призведе до нерівномірного ущільнення, ризику появи тріщин і порушення ритму опускання [103].

Організаційні перерви, що входять у модель як $t_{орг}$, формуються з часу на нарощування арматурного каркасу, установки закладних деталей, підготовки каналів для ін'єкції та усунення можливих дефектів модуль-форми [57]. Навіть якщо інтенсивність I_6 обрана оптимально та перебуває в межах від I_6^{min} до I_6^{max} , надмірні паузи можуть перервати безперервність процесу. У разі коли загальна сума таких затримок перевищує час, необхідний для бетонування наступної ділянки стін, відбувається локальна зупинка опускання, що збільшує загальний інтервал завершення етапу. Організаційні паузи, з практичного досвіду, зазвичай складають приблизно від 10 % до 20 % від основного часу бетонування, але при складних армувальних схемах або високому рівні дефектів частка $t_{орг}$ може зрости до 30 % і більше.

Враховуючи всі ці фактори, узагальнена оцінка тривалості t_{10} повинна базуватися на конкретних геометричних розмірах конструкції (висота до завершення, периметр, товщина стінки) та потужностях застосованого обладнання (інтенсивності I_6 у межах допустимого діапазону). У результаті для заданої конструкції (3 м × 20 м × 0,6 м) реалістично очікувати загальний діапазон тривалості етапу t_{10} приблизно від 19 годин (за найсприятливішого режиму $I_6 = 6 \text{ м}^3/\text{год}$) до 29 годин (за консервативної оцінки $I_6 = 4 \text{ м}^3/\text{год}$). В середньому при помірній інтенсивності $5 \text{ м}^3/\text{год}$ і стандартних організаційних

паузах етап триватиме близько 23 годин. Важливо зазначити, що точніші строки залежать від конкретної швидкості подачі бетону на площадці, реальних втрат при ущільненні, якості взаємодії зі швидкотверднучим складом (якщо застосовується) і фактичного часу, який витрачають на армування та усунення дефектів. Якщо в процесі організації робіт вдалося скоротити перерви до 10 %, то реальний час може зменшитися до діапазону від 20 до 21 години, а при дуже незначних паузах (близько 5 %) — до діапазону від 18 до 19 годин (рисунок 3.4).

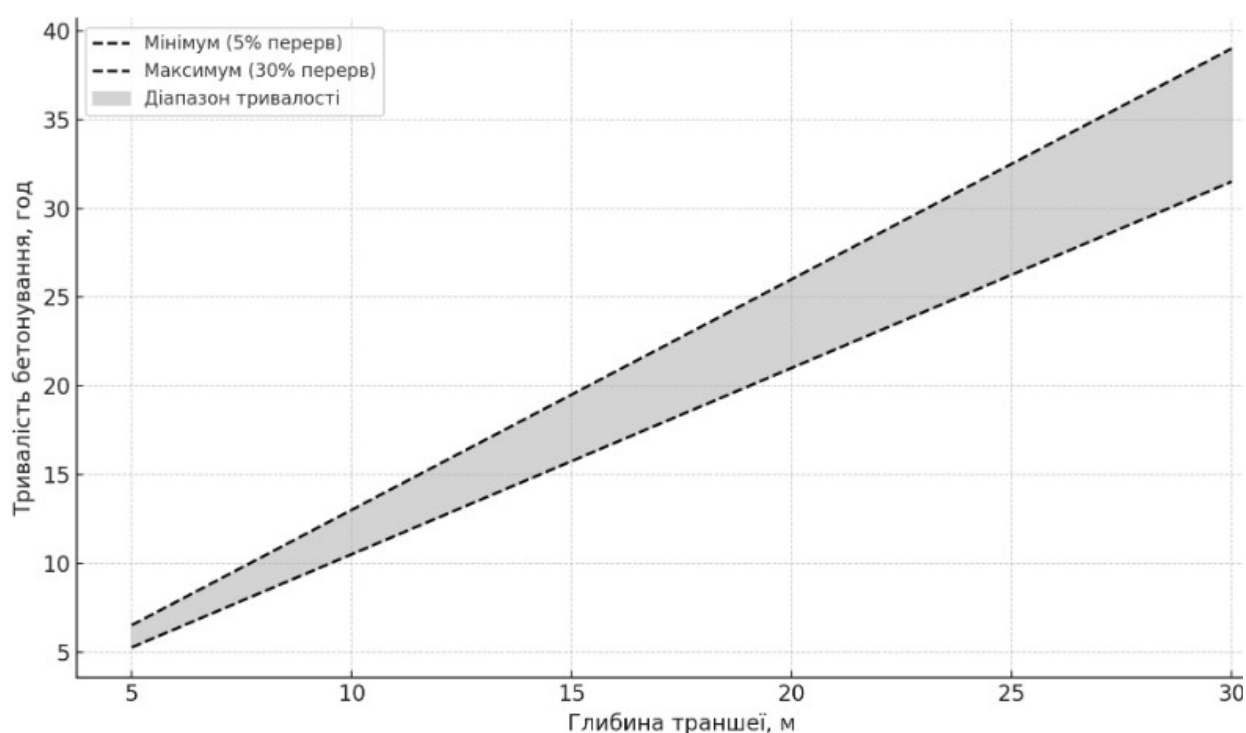


Рисунок 3.4 — Діапазон тривалості бетонування при різного рівня технологічних перерв

Етап t_{11} — фіксація конструкції до повного тверднення бетону. Коли верхівка бетонованої стінки досягає поверхні (проектної відмітки), процес опускання припиняється. Конструкцію залишають у спокої для набору марочної міцності, тобто чекають повного тверднення бетону. Формально тривалість t_{11} може дорівнювати стандартному терміну тверднення бетону, наприклад, 28 діб для звичайного цементу. Проте витримування відкритої

траншеї настільки довго без додаткових заходів є неприпустимим. Тому на практиці відразу після завершення бетонування вживаються кроки для забезпечення стійкості ґрунту та конструкції під час тверднення. Зокрема, простір між конструкцією та стінками траншеї, за потреби, засипається ущільнювальним матеріалом (щебінь, гравій) — ця операція відповідає наступному етапу t_{12} , який у нашому аналізі не розглядається детально. Засипка (тампонаж) усуває вплив рідкого середовища (глинистого розчину) і передає тиск ґрунту на саму залізобетонну стінку, яка вже частково затверділа. Таким чином, одразу після етапу t_{10} фактична відкрита траншея ліквідується, і ризик обвалення зникає. Конструкція ж залишається на місці для дозрівання бетону, але тепер вона працює як підпірна стінка котловану.

З огляду на зазначене можна сказати, що тривалість фіксації конструкції з точки зору саме підтримання технологічного процесу обирається довільно великою (для гарантії повного тверднення), але з огляду на стійкість траншеї цей етап фактично виключено з відкритої фази, якщо виконано тампонаж. Тобто на стійкість стінок впливає лише проміжок часу від початку риття траншеї до початку засипки між стінкою та ґрунтом. Саме тому для оцінки стійкості траншеї його варто визначати як мінімальний час, необхідний для проведення тампонажу після завершення бетонування. Цей процес в середньому займає від 3 до 4 годин.

Відповідно до наведеної нижче таблиці, зі збільшенням глибини траншеї з 10 м до 20 м загальна тривалість процесу зростає приблизно на 10 годин, а основним чинником цього збільшення є саме етап t_{10} — безперервне бетонування (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 — Оцінка збільшення тривалості влаштування виготовлення конструкції методом гравітаційного видавлювання на кожні 5 метрів глибини

Етап процесу	Тривалість при глибині 10 м, год	Тривалість при глибині 20 м, год
t_6	4	4
t_7	1	1
t_8	2	2
t_1^{II}	12	12
t_9	1	1
t_{10}	11–13	19–29
t_{11}	4	4
t_6-t_{11}	35–37	43–53

Інші етапи залишаються майже незмінними, оскільки не залежать від глибини. Таким чином, час безперервного занурення конструкції є критичним фактором для глибоких стінок.

Аналіз показав, що сумарна тривалість виготовлення підземної стінки методом гравітаційного видавлювання може сягати кількох діб. Критично важливо, щоб цей час не перевищував допустиму тривалість стійкого стану стінок траншеї без додаткового укріплення [104]. Глиниста суспензія певної густини здатна тимчасово утримувати ґрунт, але її ефективність обмежена в часі. Залежність сумарного часу від глибини траншеї та порівняння з умовною межею стійкості траншеї $T_{\text{ст.тр.}}$ становить 48 годин, або 2 доби (рисунок 3.5).

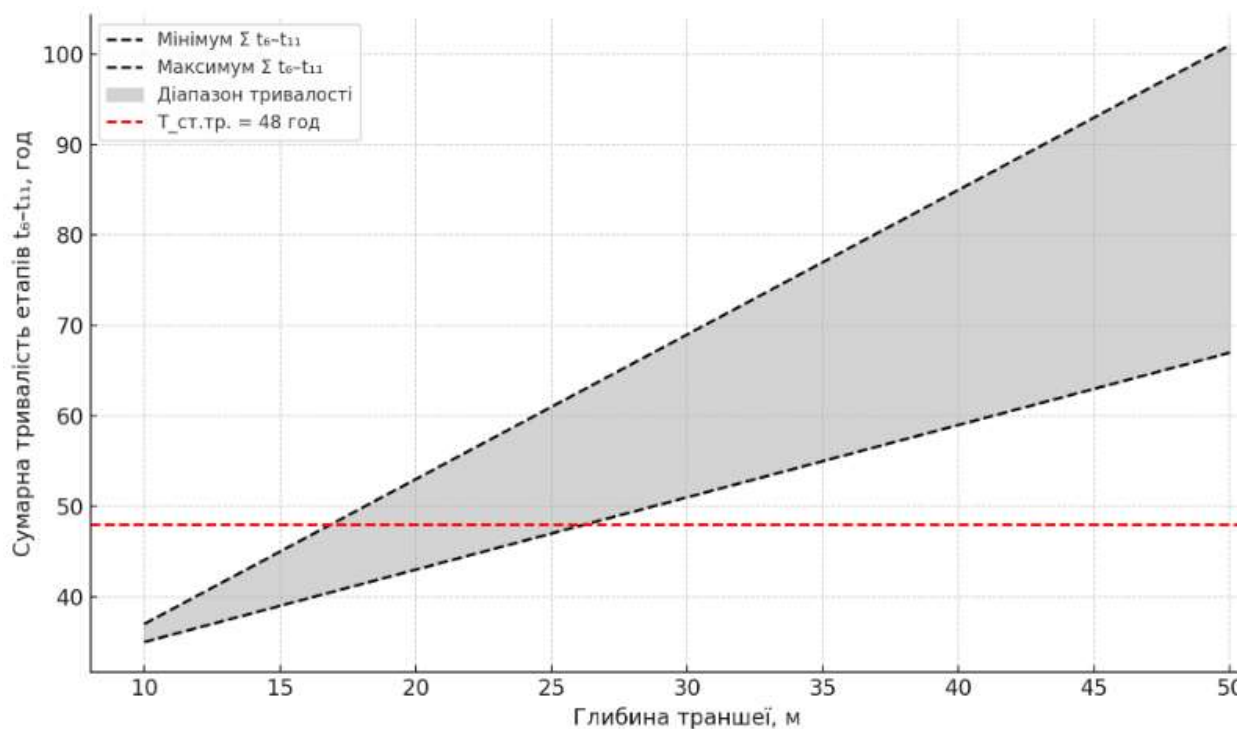


Рисунок 3.5 — Залежність сумарної тривалості від глибини траншеї

Відповідно до графіка, при глибинах траншеї до 20 м сумарна тривалість виконання всіх етапів ще може залишатися в межах допустимого часу стійкості (до 48 годин), хоча верхня межа діапазону вже наближається до критичного рівня. Починаючи з глибин понад 25 м, обидві межі тривалості перевищують умовну межу стійкості, що означає вихід за межі безпечного виконання процесу без додаткових заходів укріплення. За глибин 30 м і більше перевищення стає суттєвим, а за глибин від 40 м до 50 м — критичним, адже затримки в процесі можуть призвести до втрати стійкості стінок траншеї. Така динаміка підкреслює необхідність технологічної адаптації методу гравітаційного видавлювання для глибоких умов, зокрема шляхом оптимізації швидкості виконання, застосування тимчасового укріплення або змін у рецептурі глинистої суспензії.

Продуктивність основних етапів технології. Основні етапи зведення конструкції методом гравітаційного видавлювання включають:

- монтаж (установка) опалубної системи;
- бетонування першого ярусу (стартової секції);

– безперервне бетонування з поступовим опусканням конструкції.

Наведена нижче таблиця 3.3 узагальнює орієнтовні значення продуктивності для ключових етапів.

Таблиця 3.3 — Орієнтовна продуктивність основних етапів технології гравітаційного видавлювання

Етап робіт	Орієнтовна продуктивність
Монтаж опалубної системи	1,5 м системи/годину (довжина стіни, зібрана за годину бригадою)
Бетонування першого ярусу	від 3 м ³ /зміну до 5 м ³ /зміну (залівка стартового блоку бетону протягом однієї зміни)
Безперервне бетонування	від 5 м/добу до 10 м/добу вертикального опускання (приблизно від 10 м ³ /добу бетонування до 20 м ³ /добу бетонування)

Монтаж системи. Продуктивність монтажу вимірюється не обсягом бетону, а довжиною (або площею) конструкції, підготовленої до бетонування за одиницю часу [105]. Продуктивність цього процесу приблизно 1,5 погонних метри стіни на годину при роботі однієї бригади. Такий темп є співставним з монтажними роботами для ковзної опалубки аналогічного масштабу, що підтверджується нормативними даними. Наприклад, трудовитрати на монтаж чи демонтаж системи ковзної опалубки для стін житлового будинку сягають приблизно 0,825 люд.-дня на 1 м² стіни. Орієнтовно за одну годину можна змонтувати опалубну систему для приблизно від 1,5 м до 2 м довжини стіни.

Бетонування першого ярусу. Для типового поперечного перерізу товщиною 0,6 м і висотою 2,0 м (цей розмір обрано з урахуванням стандартної висоти опалубного листа 2 м), та довжиною секції, наприклад, 3 м, об'єм заливки становить 3,6 м³ бетону. За наявності змінного графіка роботи (два 8-

годинні чергування) один секційний блок об'ємом приблизно $3,6 \text{ м}^3$ можна виконати протягом однієї робочої зміни (8 год), якщо використовувати один бетононасос середньої продуктивності (приблизно $5 \text{ м}^3/\text{год}$) разом із двома міксерами (рисунок 3.6).

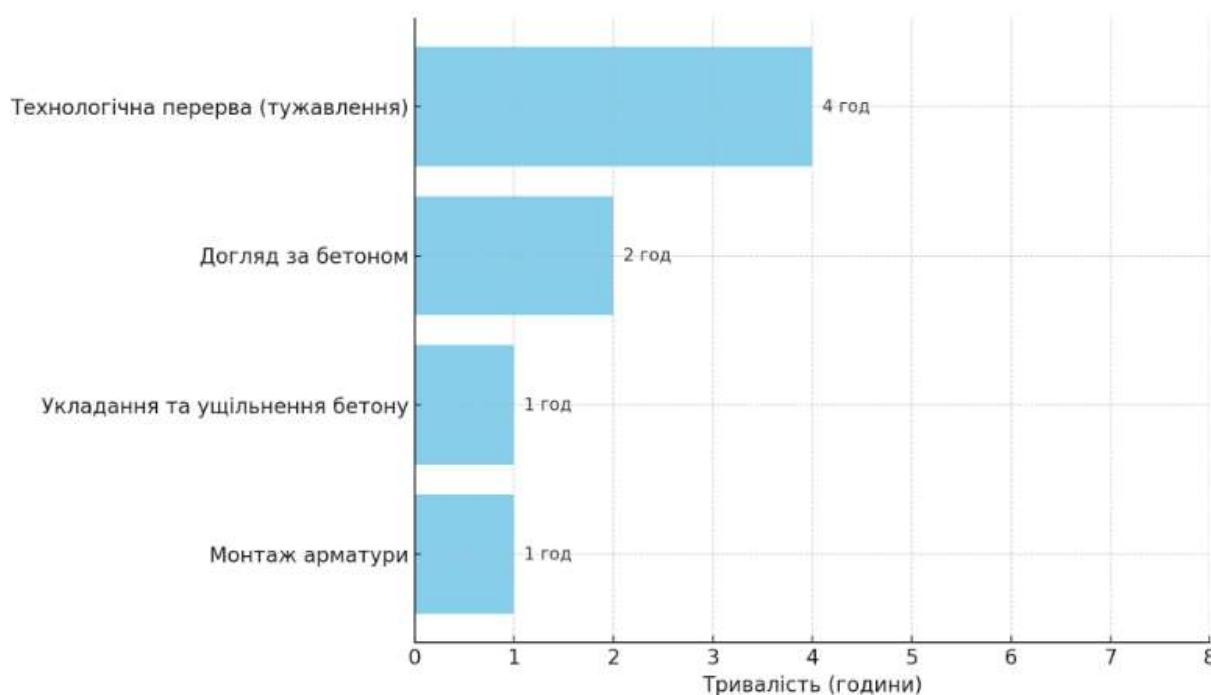


Рисунок 3.6 — Розподіл часу на бетоннування першого ярусу

Заздалегідь виготовлений (зварений) каркас із попередніми випусками під наступний нарощувальний етап дозволяє швидко опустити його в опалубку й зафіксувати [54]. Типова трудомісткість монтажу каркаса площею 3 м^2 становить приблизно від 6 людино-годин до 8 людино-годин (дві бригади по 3 або 4 особи відповідно). За продуктивності бетононасоса $5 \text{ м}^3/\text{год}$ заливка всіх $3,6 \text{ м}^3$ займає приблизно 0,8 годин (близько 48 хв). Окремо в межах від 15 хв до 20 хв витрачається час на розподіл і вібрацію суміші для заповнення всієї товщини 2 м одночасно. Після ущільнення необхідно виконати захист поверхні (покриття поліетиленом чи спеціальною плівкою) та періодичне зволоження впродовж перших 2 години, щоб уникнути швидкого випаровування вологи [56]. Після заливки відбувається набір міцності до діапазону приблизно від 5

МПа до 8 МПа. Мінімальний час для досягнення цієї межі за даними випробувань бетону С25/30 (В30) становить від 8 до 2 годин при +20 °С.

Продуктивність бетонування першого ярусу для типового перерізу $0,6 \times 2 \times 3 \text{ м}^3$ становить приблизно від 3 м³/зміну до 4 м³/зміну (тобто в межах приблизно від 6 м³/добу до 8 м³/добу), що дозволяє забезпечити своєчасний початок екструзійного опускання через проміжок часу від 8 до 12 годин після заливки. Цього рівня продуктивності достатньо, щоб у межах стандартної добової уваги на стійкість траншеї (48 годин) підготувати весь периметр навіть великої будівлі з багатьма секціями. Якщо, окрім однієї секції, працювати паралельно в кількох місцях, то загальний темп пропорційно зростає. Така організація дозволяє уникнути «вузького місця» у виробничому ланцюжку й гарантувати безперервність екструзії бетонної стіни.

Безперервне бетонування (основний етап). Після тверднення першого ярусу переходять до головного процесу — безперервного нарощування бетонної стіни і її одночасного опускання в ґрунт. Бетонна суміш подається безперервно зверху, заповнюючи опалубку, а затужавілі нижні шари поступово виходять знизу опалубки і стіна осідає глибше в ґрунт. Продуктивність цього етапу можна характеризувати швидкістю вертикального переміщення конструкції й обсягом укладання бетону за добу [106]. Залежно від технологічних можливостей та властивостей бетону, типовий діапазон швидкості опускання становить приблизно від 0,2 м/год до 0,5 м/год, що відповідає приблизно від 5 м до 12 м поглиблення на добу. На практиці реальна швидкість опускання залежить від низки факторів: інтенсивності тужавіння бетону, тертя між стіною та ґрунтом, ефективності контролю опускання і подачі бетонної суміші. Орієнтовно можна прийняти середню швидкість безперервного бетонування близько 0,3 м/год (приблизно 7 м/добу) як базову для моделювання.

У термінах обсягу робіт ця швидкість означає, що за добу безперервного бетонування можна укласти приблизно від 10 м³ до 20 м³ монолітного бетону (залежно від поперечного перерізу стіни). Таким чином, продуктивність

основного етапу в середньому складає порядку десятків кубометрів бетону на добу для однієї секції стіни. Цей показник порівнюваний з традиційною технологією «стіна в ґрунті», оскільки там одна секція-«захватка» (довжиною 3 м, глибиною 20 м, товщиною 0,6 м та об'ємом приблизно 36 м^3) може бути забетонована в межах від 2 до 3 годин, тобто потенційно до 1 панелі за добу. Гравітаційне видавлювання не поступається за швидкістю укладанню бетону, при цьому має перевагу безперервності процесу, адже відсутні технологічні шви між захватками, а стіна формується як єдиний моноліт. Безперервний процес бетонування забезпечує високу швидкість зведення конструкції, що було однією з цілей впровадження цього методу.

Вплив глибини та параметрів на продуктивність. Важливо розуміти, що загальна продуктивність технології залежить від масштабних параметрів, зокрема від глибини занурення стіни та обраної швидкості опускання. Середньодобова продуктивність ($\text{м}^3/\text{добу}$ бетонованої стіни) від глибини конструкції для двох варіантів швидкості опускання відповідає значенням 5 м/добу (класичний сценарій) і 10 м/добу (оптимістичний сценарій) (рисунок 3.7).

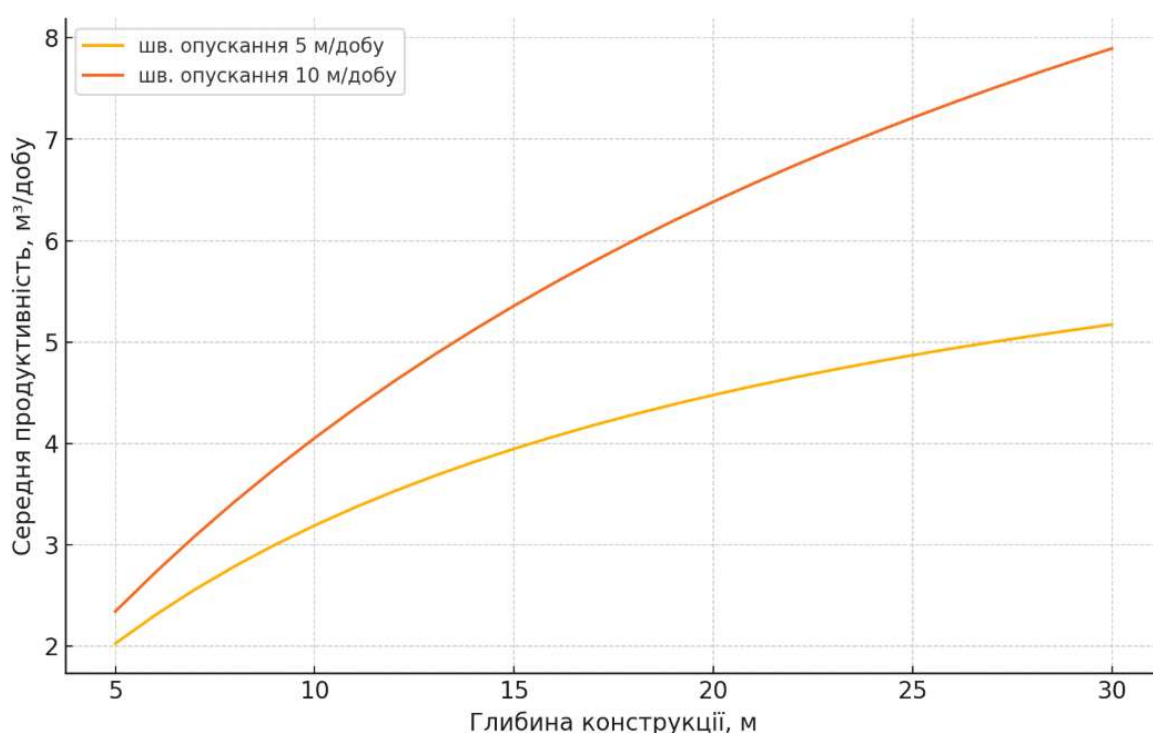


Рисунок 3.7 — Залежність продуктивності від глибини та швидкості опускання

На рисунку 3.7 прослідковується, що на малих глибинах (наприклад, від 5 м до 10 м) значна частка часу витрачається на підготовчі роботи, тому середня продуктивність у перерахунку на добу низька (лише в межах приблизно від 2 м³/добу до 4 м³/добу). Але зі збільшенням глибини ефективність різко зростає, оскільки монтажні витрати розподіляються на більший обсяг бетону, тобто в межах глибини від 20 м до 30 м можна досягти продуктивності приблизно від 6 м³/добу до 8 м³/добу. Відповідно, чим глибша споруда, тим вигідніше застосовувати технологію гравітаційного видавлювання, оскільки вона виходить на проєктну потужність і наближається до максимально можливого темпу безперервного бетонування. Натомість для дуже неглибоких об'єктів ця технологія менш раціональна (занадто великі підготовчі витрати часу).

Збільшення швидкості опускання прямо підвищує продуктивність (рисунок 3.7). Однак занадто висока швидкість може бути обмежена технологічно, оскільки бетон повинен встигати набирати міцність, а стіна — рівномірно осідати без перекосів. При ковзному формуванні надто повільний рух форми призводить до прилипання бетону і дефектів, а надто швидкий — до відриву опалубки від сирого бетону. Аналогічно, при гравітаційному видавлюванні існує оптимальний діапазон швидкостей (приблизно від 0,3 м/год до 0,5 м/год), перевищення якого може спричинити підвищене тертя і ризик заклинювання конструкції або недотримання необхідної якості стіни. Тому в реальних умовах підвищення швидкості опускання понад нормативну не завжди приводить до економії часу, оскільки можуть виникати простой на виправлення дефектів чи додаткові заходи стабілізації ґрунту. З іншого боку, надто повільне опускання неефективне, бо затягує строк будівництва. Оптимізація швидкості — це одне з ключових завдань для забезпечення максимальної продуктивності без втрати якості.

3.2 Дослідження трудомісткості та оцінка собівартості виготовлення стінових конструкцій методом гравітаційного видавлювання

Далі буде розглянуто кожен етап з боку трудомісткості, тобто витрат праці робітників, виміряних у людино-годинах (люд.-год) або людино-днях. Для оцінки використано середні нормативні показники, взяті з практики застосування схожих технологій: ковзної опалубки та «стіни в ґрунті», з поправками на специфіку технології гравітаційного видавлювання [107]. Пряме порівняння з цими технологіями не проводиться, але їх нормативи слугують базою для приблизних розрахунків. Таблиця 3.4 наводить орієнтовні трудовитрати на кожен ключовий етап для однієї типової секції конструкції.

Таблиця 3.4 — Орієнтовна трудомісткість виконання ключових етапів гравітаційного видавлювання

Етап робіт	Орієнтовна продуктивність	Нормативи
Монтаж опалубної системи	близько 60 люд.-год	близько 6 робітників × 1 зміну
Бетонування першого ярусу	близько 30 люд.-год	(бригада 5 робітників × 6 год роботи)
Безперервне бетонування	близько 320 люд.-год	(2 зміни по 8 робітників за приблизно 2 доби)

Монтаж системи. Усереднена норма витрат праці складає приблизно 16 люд.-год на 1 м довжини модуль-форми. Для типового блоку в 3 м це приблизно 48 люд.-год, з урахуванням допоміжних операцій округлено до 60 люд.-год. Бригада з 6 монтажників виконує цей обсяг за одну 8-годинну зміну. Таким чином продуктивність монтажу становить близько 3 м/зміну (або приблизно 30 м² опалубленої площі за зміну). Після переходу системи на

наступну секцію монтажні затрати розподіляються, що знижує питому трудомісткість. Отже, монтаж системи гравітаційного видавлювання — це один із найвитратніших за працею етапів, частка якого може сягати приблизно 15 % від загальних трудовитрат.

Бетонування першого ярусу. Трудомісткість цього етапу відносно невелика, оскільки обсяг робіт малий. Необхідні операції включають: приготування бетонної суміші, установка бетононасоса, заливка та вібрування бетону у форму, догляд за бетоном на початковому етапі тужавіння [55]. Ці роботи виконуються невеликою бригадою (наприклад, 5 осіб) протягом кількох годин. Орієнтовно можна закласти від 20 люд.-год до 40 люд.-год на весь цикл бетонування стартового ярусу. Складовими цього є: 5 робітників × приблизно від 4 до 6 годин прямої роботи з бетонування та додаткові заходи (контроль якості, очищення обладнання). У порівнянні з іншими етапами, це незначна частка (приблизно від 5 % до 10 % від сумарної трудомісткості).

Безперервне бетонування (основний етап). Залежно від технологічних можливостей та властивостей бетонної суміші, типовий діапазон швидкості опускання становить приблизно від 0,2 м/год до 0,5 м/год, що приблизно відповідає від 5 м до 12 м заглиблення на добу. Це співставно зі швидкостями ковзної опалубки (підйом від 0,3 м/год до 0,5 м/год або від 7 м/добу до 12 м/добу), тобто метод гравітаційного видавлювання теоретично дозволяє досягати аналогічного темпу вертикального формування конструкції. На практиці реальна швидкість опускання залежить від низки факторів: інтенсивності тужавіння бетону, тертя між стіною та ґрунтом, ефективності контролю опускання (домкратами чи гальмівними пристроями) і подачі бетонної суміші. Орієнтовно можна прийняти середню швидкість безперервного бетонування близько 0,3 м/год (приблизно 7 м/добу) як базову для моделювання.

У термінах обсягу робіт ця швидкість означає, що за добу безперервного бетонування можна укласти приблизно від 10 м³ до 20 м³ монолітного бетону (залежно від поперечного перерізу стіни) (рисунок 3.8).

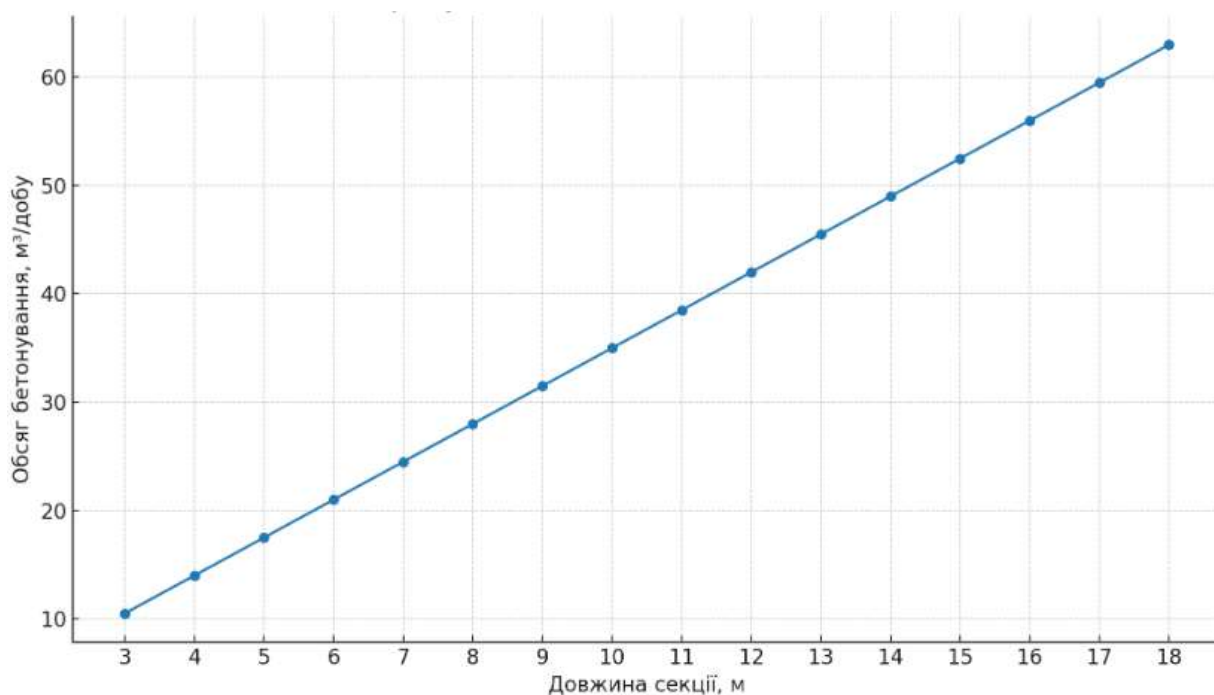


Рисунок 3.8 — Залежність продуктивності від довжини секції стіни (від 3 м до 18 м)

Таким чином, продуктивність основного етапу в середньому складає порядку десятків кубометрів бетону на добу для однієї секції стіни. Цей показник порівнюваний з традиційною технологією «стіна в ґрунті», оскільки там одна секція-«захватка» (довжиною, наприклад, 6 м, глибиною 20 м, товщиною 0,6 м й об'ємом близько 72 м³) може бути забетонована за період часу від 4 до 6 годин, тобто потенційно до 1 панелі за добу. Гравітаційне видавлювання не поступається за швидкістю укладання бетону, а для об'єктів зі значною довжиною стіни гравітаційне видавлювання забезпечує вищу інтенсивність бетонування (рисунок 3.9).

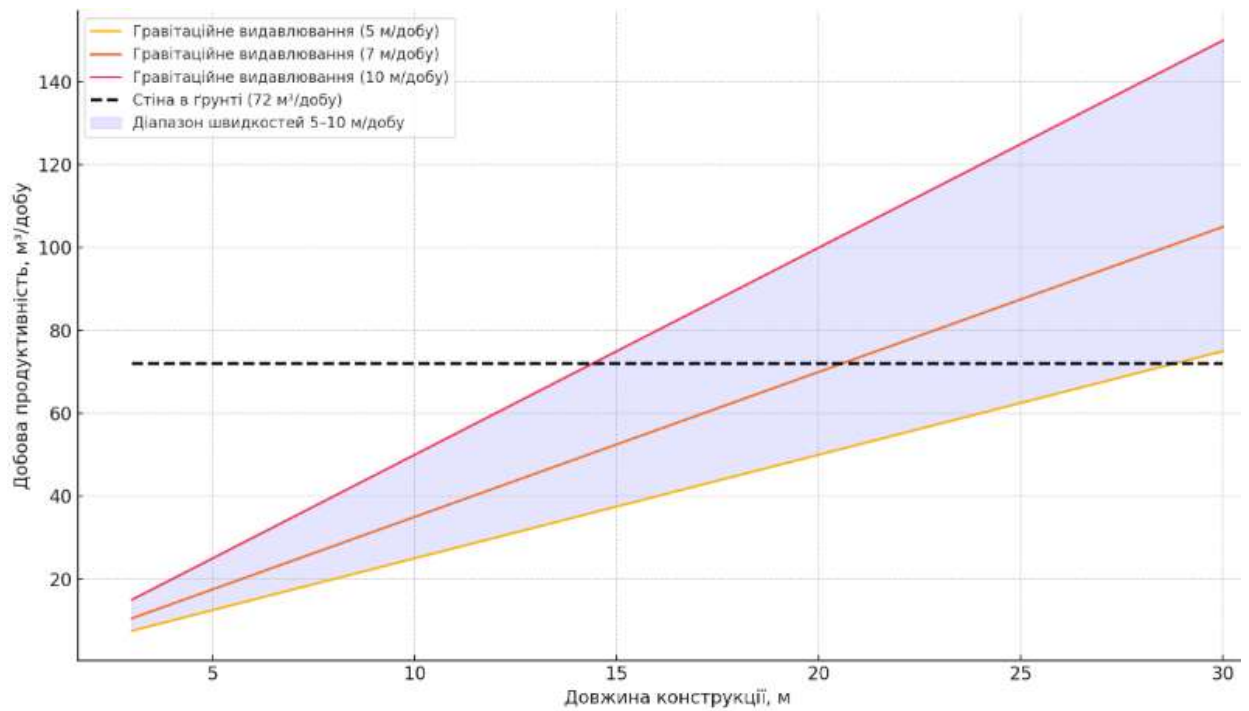


Рисунок 3.9 — Порівняння добової продуктивності залежно від довжини конструкції

Ключова роль основного циклу t_{10} . Узагальнене моделювання показало, що близько $\frac{3}{4}$ (приблизно 73 %) усіх трудових витрат припадає на безперервне бетонування-опускання конструкції (рисунок 3.10).

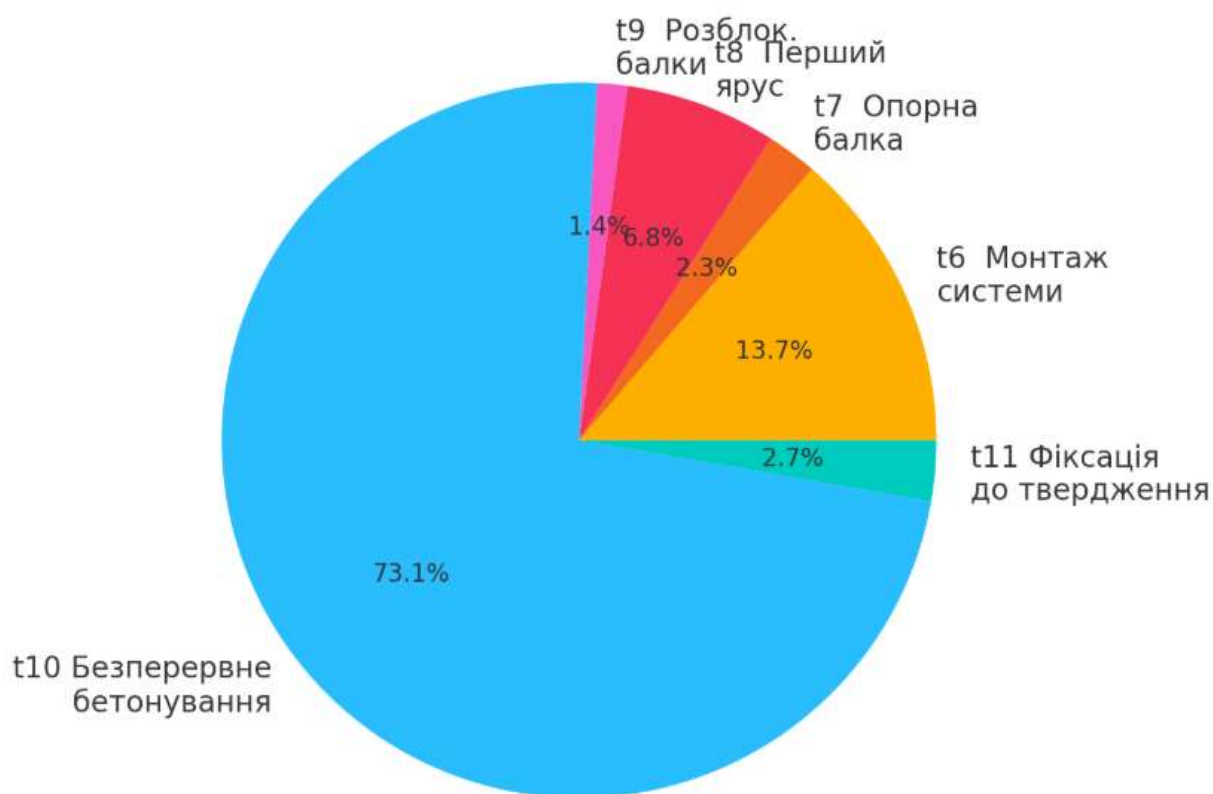


Рисунок 3.10 — Частка кожного етапу у загальній трудомісткості

Саме цей етап визначає і добову продуктивність (від 5 м до 10 м заглиблення або від 10 м³ до 20 м³ бетону на добу), і межу практичної глибини, за якої метод залишається економічно доцільним.

Підготовчі роботи $t_6 + t_7 + t_8$ становлять близько 23 % загальної трудомісткості. Монтаж модуль-форми (t_6 , 60 люд.-год) — це найбільший підготовчий вклад (близько 14 %). Установка опорної балки (t_7 , 10 люд.-год) та формування стартового ярусу (t_8 , 30 люд.-год) разом забезпечують технологічний запуск процесу, але не є критичними для темпу всього циклу.

Допоміжні операції $t_9 + t_{11}$ (<5 %) практично не впливають на графік. Зняття фіксаторів і первинна фіксація стінки до набору марочної міцності виконуються паралельно з нульовими або мінімальними паузами у бетонуванні.

Розглянемо порівняльний аналіз собівартості спорудження підземної стінки двома способами: методом гравітаційного видавлювання та традиційною технологією «стіна в ґрунті». Базова товщина конструкції приймається за 0,6 м (однакова для обох методів). Аналіз обмежується основним етапом формування стінки та не включає початкові роботи з розробки траншеї під глинистим розчином, оскільки ці підготовчі етапи ідентичні для обох технологій. Таким чином, зосередимо увагу на безпосередньому влаштуванні конструкції різними методами. Для порівняння виділено ключові операції кожної технології виготовлення стінки (поза початковим риттям траншеї).

Метод гравітаційного видавлювання. Спочатку проводять монтаж системи гравітаційного видавлювання, укладання бетонної суміші шарами з одночасним поступовим опусканням сформованої частини стінки під дією власної ваги бетону, потім відбувається досягнення проєктної глибини та витримка конструкції до набору міцності, після чого відбувається демонтаж опалубних модулів для повторного використання. У результаті формується монолітна залізобетонна стінка без робочих швів, еквівалентна за функціями «стіни в ґрунті», але виконана за альтернативною технологією ковзної опалубки.

Технологія «стіна в ґрунті». Спочатку проводять встановлення напрямних по верху траншеї, виготовлення та монтаж арматурного каркасу у відкриту траншею, потім відбувається заливка траншеї бетонною сумішшю через трубу знизу вверх та витіснення глинистого розчину бетоном, після чого — витримка до тверднення [108]. Внаслідок бетонування у ґрунтово-глинистому середовищі якість поверхні такої стінки нижча: при контакті з ґрунтом і розчином утворюється шар дефектного бетону, нерівності, напливи тощо. Тому після розкриття котловану часто потрібне додаткове опорядження поверхні: наприклад, очищення або фрезерування слабкого шару, нанесення торкрет-бетону чи гідроізоляції тощо для забезпечення проєктної якості поверхні (аналогічно практиці методу «top-down»).

Основні фактори, що впливають на собівартість двох методів — це витрати матеріалів (бетон, арматура, витратні матеріали), вартість експлуатації обладнання (насоси для бетонування, крани, установки для приготування та очистки розчину), а також трудові витрати на монтажні та бетонні роботи. На одиницю площі стінки (1 м^2) метод гравітаційного видавлювання є матеріально економнішим завдяки більш раціональному використанню матеріалів. Зокрема, для стінки товщиною 0,6 м об'єм бетону на 1 м^2 готової конструкції при «видавлюванні» близький до проєктного (близько $0,6 \text{ м}^3/\text{м}^2$) із мінімальними втратами (приблизно від 0 % до 2%), тоді як при методі «стіна в ґрунті» цей показник значно вищий — орієнтовно від $0,8 \text{ м}^3/\text{м}^2$ до $1,2 \text{ м}^3/\text{м}^2$ (за рахунок вимушеного збільшення товщини захватки та перевитратам бетону до 15 %). Відповідно, традиційна стіна в ґрунті потребує приблизно від 30 % до 50 % більше бетонної суміші на ту ж площу стіни. Причиною цього є втрати бетону при заливці в траншею (перетікання суміші в ґрунтові порожнини, перелив над рівнем проєктної відмітки, утворення піни в розчині тощо). Метод гравітаційного формування стінки уникає більшості таких втрат, оскільки бетон укладається в замкненому об'ємі модуль-форми та не змішується зі суспензією. Відповідно, глиниста суспензія (бентонітовий розчин) для підтримання стінок траншеї витрачається лише на етапі копання, але не потребує поповнення під час влаштування конструкції гравітаційним методом. Для звичайної технології витрати глинистого розчину є суттєвими — близько 1 м^3 суспензії на 1 м^3 траншеї (густина приблизно від $1,03 \text{ т}/\text{м}^3$ до $1,07 \text{ т}/\text{м}^3$), який потребує спеціальної підготовки, очищення та часткової утилізації. Це збільшує прямі витрати та логістику. За оцінками, лише матеріал бентоніту (від 50 кг до 100 кг на 1 м^3 розчину) додає порядку від 1,5 до 2 тис. грн на кожен кубометр траншеї. Таким чином, відсутність потреби у великому обсязі глинистого розчину та менша перевитрата бетону при гравітаційному видавлюванні прямо знижують собівартість 1 м^2 стінки. Натомість для «стіни в ґрунті» додаткові витрати спричиняють як сам розчин і перевитрати бетону, так і необхідність опорядження поверхні після розкриття. Ці операції

(очищення, торкретування тощо) додають вартості, якої не потребує якісно забетонована в модуль-формі стіна.

Товарний бетон важких класів (наприклад, C32/40, W8 F200) коштує близько 4000 грн за 1 м³ (без доставки). Сталева арматура (клас А400/500С) за цей період має ринкову вартість приблизно від 30 до 35 тис. грн за тону. Вартість кваліфікованої праці будівельників та машиністів в Україні становить орієнтовно від 80 грн/год до 120 грн/год на одну особу, а експлуатація важкої будівельної техніки (крани, насосні станції) — від 1500 грн/год і більше залежно від типу. Для оцінки собівартості на 1 м² стінки ці ціни закладено в оцінці. Зокрема, прийнято витрати бетону та арматури відповідно до наведених вище питомих об'ємів, норми трудовитрат на монтаж опалубки і каркасу (порядку 0,8 люд./день на 1 м²), а також враховано амортизацію опалубної системи. Умовно-фіксовані затрати (монтаж та демонтаж обладнання, підготовка сумішей тощо) розподілено на типову захватку.

На основі оцінки отримано залежності собівартості 1 м² стінки від глибини занурення конструкції для обох методів (рисунок 3.11).

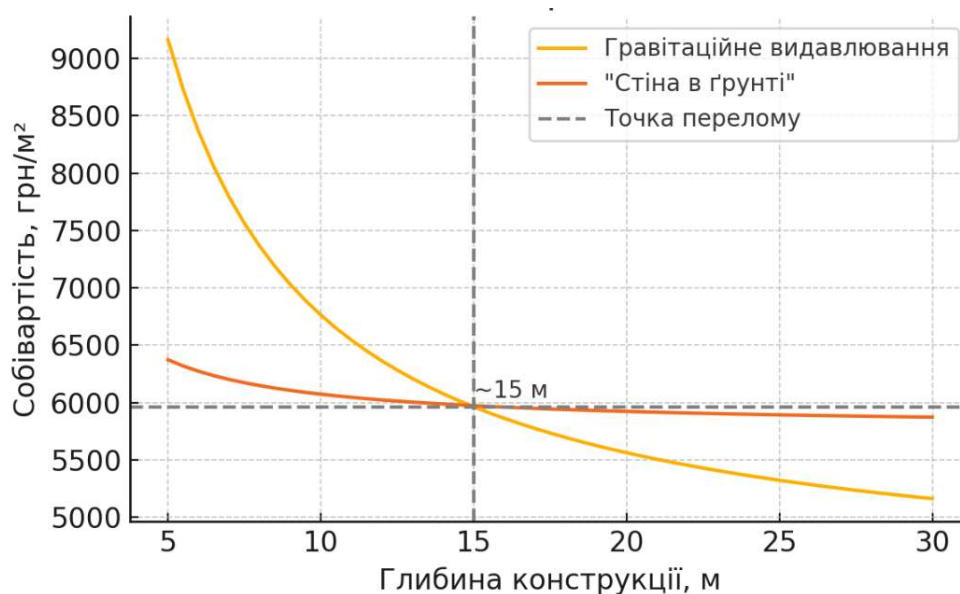


Рисунок 3.11 — Залежність собівартості від глибини

Відповідно до рисунку 3.11 при малій глибині (від 5 м до 10 м) собівартість гравітаційного метода вища за традиційний — це пояснюється

впливом умовно-фіксованих затрат на опалубку та організацію процесу, які при незначному обсязі робіт суттєво збільшують ціну квадратного метра. Натомість зі збільшенням глибини ефективність гравітаційного видавлювання різко зростає, оскільки ті самі підготовчі витрати розподіляються на більші обсяги бетонування. Отже, зі збільшенням глибини (висоти) стінки собівартість 1 м^2 за гравітаційною технологією знижується набагато швидше, ніж за традиційною технологією. При глибині понад близько 15 м витрати на 1 м^2 зрівнюються, а для ще більших глибин метод гравітаційного видавлювання вже дає економію.

Для кількісної оцінки при глибині близько 5 м орієнтовна собівартість стіни в ґрунті становить 6300 грн/м², тоді як гравітаційне видавлювання (з урахуванням витрат на опалубні роботи) може сягати приблизно від 9000 грн/м² до 10000 грн/м². При 10 м різниця скорочується (близько 6000 грн/м² порівняно з 6700 грн/м²). В діапазоні від 12 м до 15 м криві зближаються, тобто, наприклад, для 15 м глибини обидва способи забезпечують близько 6000 грн/м². На більших глибинах гравітаційний метод стає вигіднішим: наприклад, при 20 м економія становить близько 6 %, а при 30 м — приблизно від 8 % до 10% (орієнтовно 5400 грн/м² порівняно з 5900 грн/м²). Гранична глибина, починаючи з якої собівартість гравітаційного видавлювання менша, складає приблизно 15 м. Це значення залежить від конкретних умов проєкту: вартості мобілізації обладнання, кількості секцій стінки, геологічних умов тощо. Однак загальна тенденція очевидна — для відносно неглибоких підземних конструкцій традиційна технологія економічно доцільніша, тоді як при значних глибинах гравітаційне видавлювання забезпечує зниження собівартості.

Таким чином, аналіз собівартості показав, що за поточних цін і технічних умов метод гравітаційного видавлювання конкурентоспроможний щодо технології «стіна в ґрунті» і перевершує її за економічними показниками для глибоких підземних стін (порядку від 15 м до 30 м). При цьому на одиницю площі конструкції досягається економія завдяки меншим матеріаломісткості та

витратам на подальше доведення конструкції до її проєктного вигляду. З урахуванням додаткових переваг: монолітності стінки (відсутності швів) та високої швидкості виконання робіт, гравітаційне видавлювання доцільно розглядати як ефективну альтернативу традиційній «стіні в ґрунті» для масштабних заглиблених споруд.

3.3 Дослідження монтажної ваги підземних стінових конструкцій, які виготовляються методом гравітаційного видавлювання

Монтажна вага є важливим чинником, який визначає навантаження на систему гравітаційного видавлювання та на прилеглий ґрунт до траншеї в якій зводять стінову конструкцію. Монтажна вага впливає на конструктивні рішення опорної балки й опорної частини системи гравітаційного видавлювання, а також впливає на кількість, переріз і розташування підтримувальних елементів (канатів) тощо. Крім того, вона впливає на технологічні режими та параметри виготовлення стінової конструкції [109].

Монтажна вага включає в себе не лише власну вагу конструкції, а й додаткові сили, що діють на підтримувальні елементи конструкції в процесі її виготовлення (опускання). В загальному монтажну вагу можна описати як суму векторів сил, що діє на підтримувальні елементи конструкції, за залежністю:

$$Q = \sum q_i + \sum q_j^0 - P_v - P_c - P_{оп}, \quad (3.15)$$

де Q — монтажна вага конструкції, яку виготовляють методом гравітаційного видавлювання;

$\sum q_i$ — власна вага конструкції, яку виготовлюють методом гравітаційного видавлювання;

$\sum q_j^0$ — підсумкова вага будівельної оснастки системи гравітаційного видавлювання;

P_B — виштовхувальна сила, що діє на конструкцію в рідинному середовищі (середовищі глинистого розчину) в процесі її виготовлені або сила Архімеда;

P_c — сила тертя, що виникає між конструкцією і глинистим розчином в процесі її опускання в траншеї;

$P_{оп}$ — сила тертя, що виникає між бетонною сумішшю і поверхнею опалубки.

В дослідженнях власну вагу стінової конструкції, що виготовляється методом гравітаційного видавлювання, визначали за залежністю:

$$\sum q_i = abh\rho_6g + \mu abh\rho_{ар}g + q_{зд}g + q_6g, \quad (3.16)$$

де a , b , h — відповідно довжина, ширина та висота монолітної частини конструкції, що виготовляється методом гравітаційного видавлювання;

ρ_6 — середня щільність бетонного каменю на стадії виготовлення конструкції;

g — прискорення вільного падіння;

μ — коефіцієнт армування конструкції;

$\rho_{ар}$ — щільність матеріалу арматури;

$q_{зд}$ — сумарна маса закладних деталей;

q_6 — маса підтримувальної балки конструкції.

В дослідженнях вагу будівельної оснастки розраховували як суму ваги канатів, що застосовуються для опускання конструкції, та ваги інших засобів оснащення конструкції, за залежністю:

$$\sum q_j^0 = P_{ст}h\rho_{ст}g + q_{осн}g, \quad (3.17)$$

де $P_{ст}$ — сумарний переріз канатів, які застосовуються для опускання стінової конструкції;

$\rho_{ст}$ — щільність матеріалу канатів, що застосовуються для опускання конструкції;

$q_{\text{осн}}$ — сумарна маса інших засобів оснащення конструкції.

В дослідженнях виштовхувальну силу (силу Архімеда), що діє на конструкцію в рідинному середовищі (середовищі глинистого розчину) в процесі її виготовлення, визначали за залежністю:

$$P_{\text{в}} = (abh + V_{\text{б}})\rho_{\text{с}}g, \quad (3.18)$$

де abh — об'єм монолітної частини стінової конструкції;

$V_{\text{б}}$ — об'єм опорної балки конструкції;

$\rho_{\text{с}}$ — густина глинистого розчину.

В наступних теоретичних дослідження на основі попереднього аналізу методу «стіна в ґрунті» були розглянуті найбільш передбачувані інтервали геометричних розмірів стінових конструкцій, що можуть бути виготовлені методом гравітаційного видавлювання, а саме інтервал довжини конструкції (a) в межах від 6 м до 18 м, ширини конструкції (b) — від 0,4 м до 0,8 м і висоти конструкції (h) — від 10 м до 50 м.

В теоретичних дослідженнях були прийняті наступні щільності матеріалів, а саме щільність бетонного каменю $\rho_{\text{б}} = 2500 \text{ кг/м}^3$ і щільність металеві арматури $\rho_{\text{ар}} = 7850 \text{ кг/м}^3$. Густина глинистого розчину ($\rho_{\text{с}}$) приймали на основі досвіду застосування методу «стіна в ґрунті» і вона була в межах від 1030 кг/м^3 до 1500 кг/м^3 . Було прийнято, що коефіцієнт армування конструкції становить $\mu = 0,2$. При цьому маса закладних деталей становила $q_{\text{зд}} = 500 \text{ кг}$, а маса підтримувальної балки $q_{\text{б}} = 150 \text{ кг}$. Також було прийнято, що відстань між підтримувальними канатами конструкції гравітаційного видавлювання буде становити 2 м, а їх товщина — 18 мм (0,018 м).

Теоретичні дослідження власної ваги стінової конструкції за залежністю (3.16) виявили, що при мінімальних розмірах конструкції у розглянутому інтервалі (довжина $a = 6 \text{ м}$, ширина $b = 0,4 \text{ м}$, $h = 10 \text{ м}$) власна вага становить 965 кН, а при максимальних розмірах конструкції у

розглянутому інтервалі (довжина $a = 18$ м, ширина $b = 0,8$ м, $h = 50$ м) власна вага збільшується до 28754 кН.

Теоретичні дослідження ваги будівельної оснастки за залежністю 3.17 виявили, що вага будівельної оснастки для мінімальних розмірів конструкції, що виготовляється методом гравітаційного видавлювання, у розглянутому інтервалі буде становити $q_j^0 = 6,1$ кН. При збільшенні геометричних розмірів конструкції вага будівельної оснастки також збільшиться і при максимальних розмірах конструкції у розглянутому інтервалі вона буде становити $q_j^0 = 22,5$ кН.

Технологія влаштування підземних конструкцій методом гравітаційного видавлювання передбачає, що опускання готової конструкції буде здійснюватися в середовищі глинистого розчину, завдання якого утримувати стінки попередньо викопаної траншеї від руйнування. А тому в процесі опускання на конструкцію буде діяти виштовхувальна сила. Дослідження зміни її значень в розглянутому інтервалі розмірів конструкції виконувалися за залежністю 3.18. В результаті було встановлено, що виштовхувальна сила залежно від густини глинистого розчину приймає наступні значення:

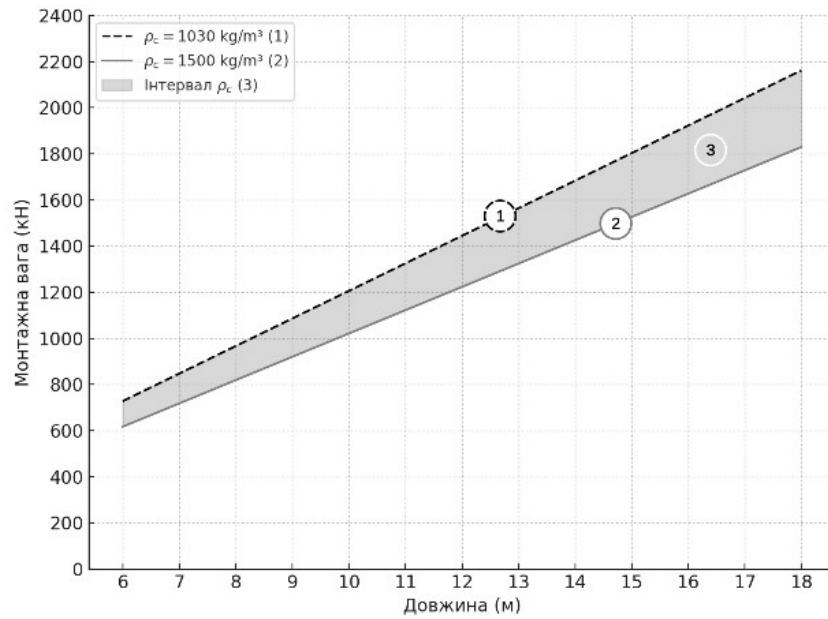
- при мінімальних розмірах стінової конструкції у розглянутому інтервалі і мінімальній густині глинистого розчину $\rho_c = 1030$ кг/м³ виштовхувальна сила становить $P_b = 242,6$ кН;
- при мінімальних розмірах конструкції і максимальній густині глинистого розчину $\rho_c = 1500$ кг/м³ вона становить $P_b = 353,3$ кН;
- при максимальних розмірах конструкції і мінімальній густині глинистого розчину $\rho_c = 1030$ кг/м³ вона досягає $P_b = 7275,4$ кН;
- при максимальних розмірах конструкції і максимальній густині глинистого розчину $\rho_c = 1500$ кг/м³ вона досягає $P_b = 10595,2$ кН.

Отже, при збільшенні розмірів конструкції, тобто її об'єму, і густини глинистого розчину відповідно збільшується значення виштовхувальної сили, що діє в середовищі глинистого розчину.

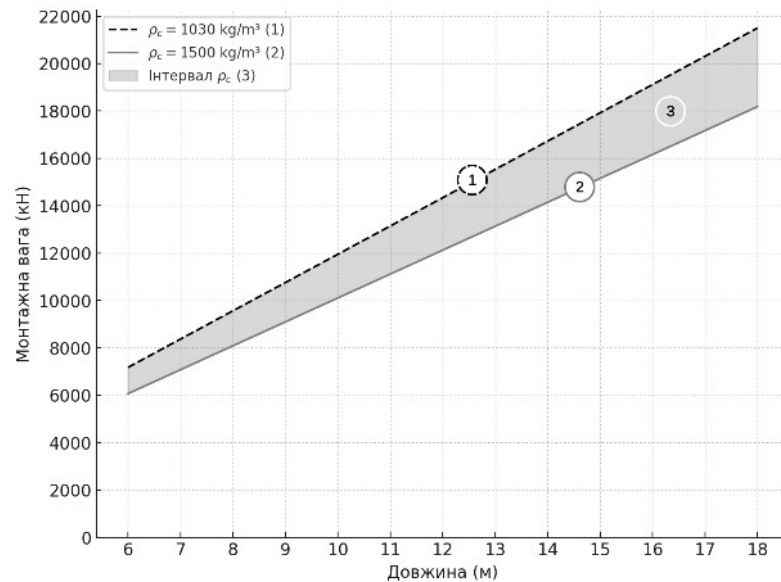
На наступному етапі теоретичного дослідження монтажної ваги конструкції, що виготовляється методом гравітаційного видавлювання, було вивчено її зміну за залежністю 3.15. В результаті було встановлено, що монтажна вага конструкції (Q) змінюється в наступних межах:

- при мінімальних розмірах стінової конструкції у розглянутому інтервалі та мінімальній густині глинистого розчину $\rho_c = 1030 \text{ кг/м}^3$ монтажна вага конструкції становить $Q = 728,1 \text{ кН}$;
- при мінімальних розмірах конструкції та максимальній густині глинистого розчину $\rho_c = 1500 \text{ кг/м}^3$ вона становить $Q = 617,4 \text{ кН}$;
- при максимальних розмірах конструкції та мінімальній густині глинистого розчину $\rho_c = 1030 \text{ кг/м}^3$ вона становить $Q = 21501,1 \text{ кН}$;
- при мінімальних розмірах конструкції та максимальній густині глинистого розчину $\rho_c = 1500 \text{ кг/м}^3$ вона становить $Q = 18182,3 \text{ кН}$.

Далі були виконані теоретичні дослідження впливу геометричних розмірів стінової конструкції на її монтажну вагу. Спочатку було досліджено вплив зміни довжини конструкції в діапазоні від 6 м до 18 м на монтажну вагу конструкції при фіксованих значеннях інших розмірів (рисунок 3.12).



а

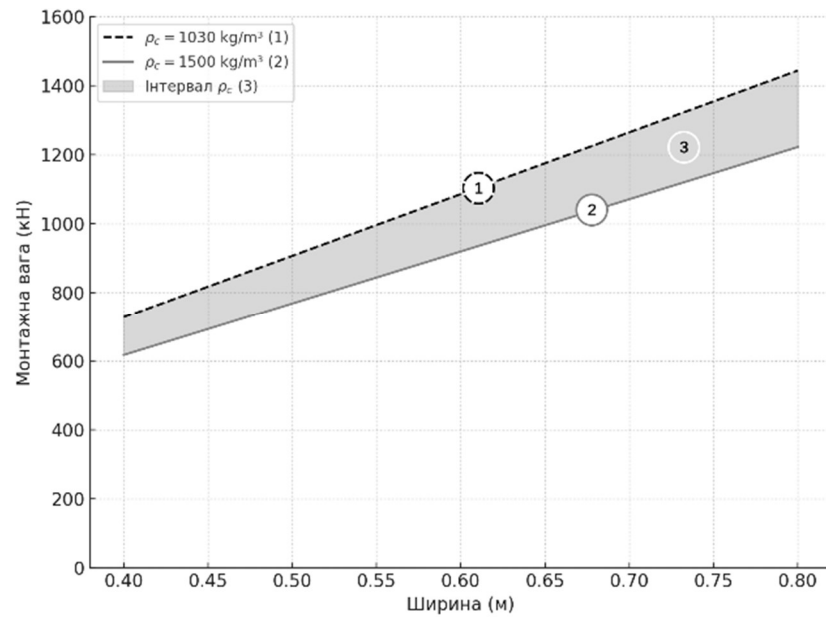


б

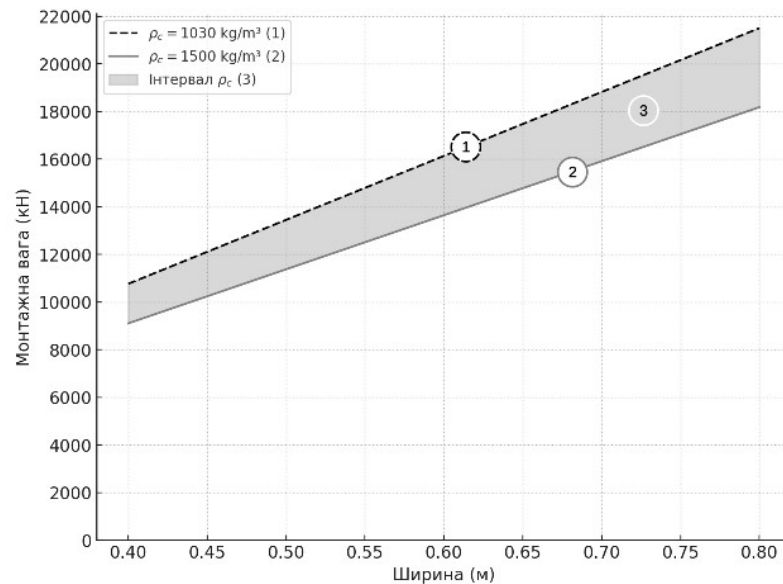
Рисунок 3.12 — Область зміни монтажної ваги конструкції, що виготовляється методом гравітаційного видавлювання, в залежності від зміни її довжини в межах від 6 м до 18 м, при а — мінімальних інших розмірах конструкції ($b = 0,4$ м, $h = 10$ м); б — максимальних інших розмірах конструкції ($b = 0,8$ м, $h = 50$ м). 1 — залежність при $\rho_c = 1030$ кг/м³; 2 — залежність при $\rho_c = 1500$ кг/м³; 3 — область зміни інших значень монтажної ваги при зміні густини розчину від 1030 кг/м³ до 1500 кг/м³.

Встановлено дві області зміни монтажної ваги конструкції, що виготовляється методом гравітаційного видавлювання, залежно від зміни її довжини в межах від 6 м до 18 м. Перша — для мінімальної ширини b і висоти h конструкції (рисунок 3.12, а), друга — для максимальних значень ширини b і висоти h (рисунок 3.12, б). Дослідження проводили з урахуванням зміни густини глинистої суспензії в інтервалі від 1030 кг/м^3 до 1500 кг/м^3 . Результати показали, що збільшення довжини конструкції з 6 м до 18 м може призвести до зростання монтажної ваги до 67%.

На наступному етапі було досліджено вплив зміни ширини конструкції від 0,4 м до 0,8 м на її монтажну вагу при фіксованих значеннях інших параметрів (рисунок 3.13).



а

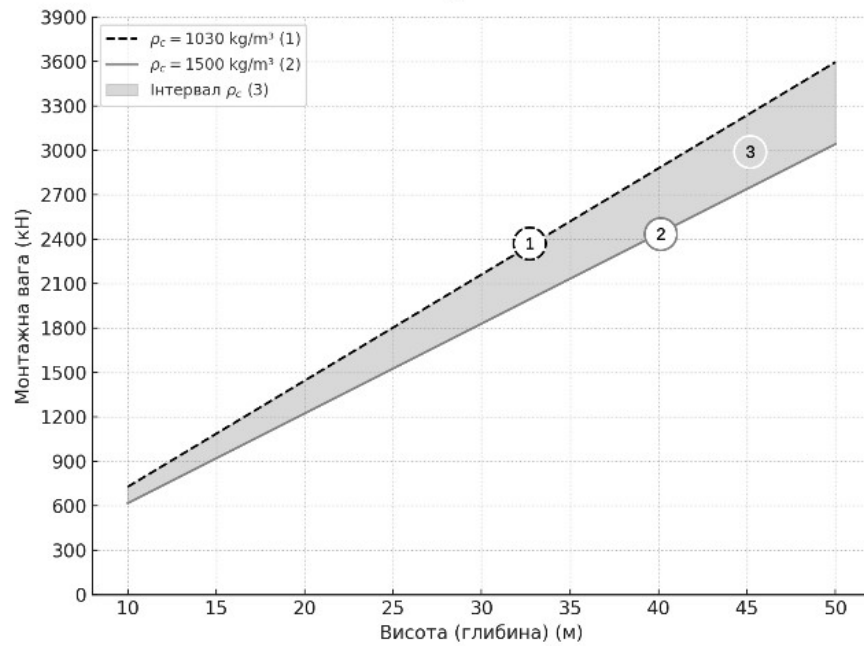


б

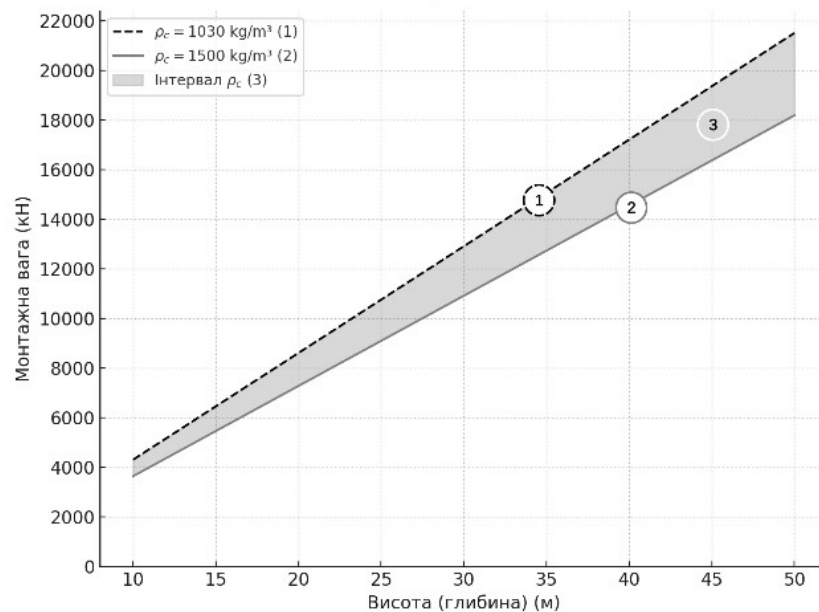
Рисунок 3.13 — Область зміни монтажної ваги конструкції, що виготовляється методом гравітаційного видавлювання, в залежності від зміни її ширини в межах від 0,4 м до 0,8 м, при а — мінімальних інших розмірах конструкції ($a = 6$ м, $h = 10$ м); б — максимальних інших розмірах конструкції ($a = 18$ м, $h = 50$ м). 1 — залежність при $\rho_c = 1030$ кг/м³; 2 — залежність при $\rho_c = 1500$ кг/м³; 3 — область інших значень монтажної ваги при зміні густини розчину від 1030 кг/м³ до 1500 кг/м³.

Виявлено дві області зміни монтажної ваги конструкції, що виготовляється методом гравітаційного видавлювання, залежно від зміни її ширини в межах від 0,4 м до 0,8 м. Перша — для мінімальної довжини a і висоти h конструкції (рисунк 3.13, а), друга — для максимальних значень довжини a і висоти h (рисунк 3.13, б). Дослідження проводили з урахуванням зміни густини глинистої суспензії в інтервалі від 1030 кг/м³ до 1500 кг/м³. В результаті було встановлено, що зміна ширини конструкції в межах від 0,4 м до 0,8 м може призвести до зростання монтажної ваги до 50%.

В подальшому було досліджено вплив зміни висоти конструкції від 10 м до 50 м на її монтажну вагу при фіксованих інших розмірах (рисунк 3.14).



а



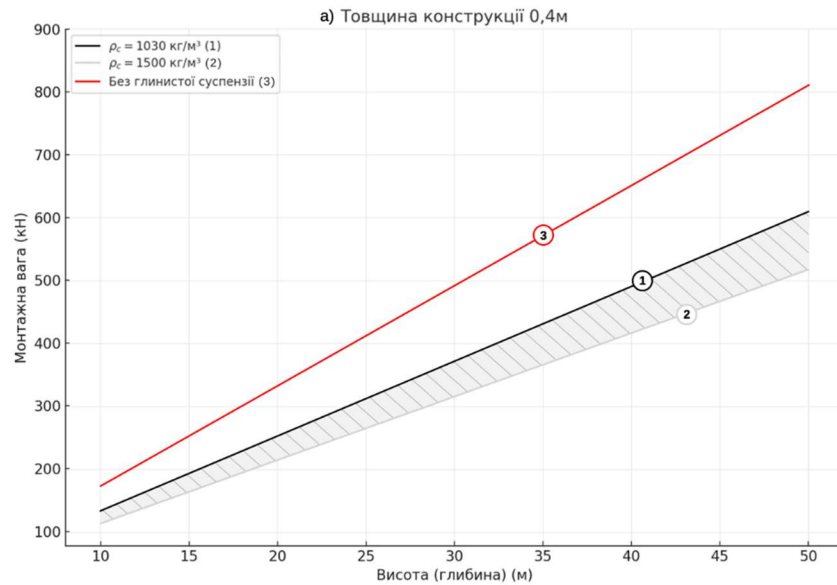
б

Рисунок 3.14 — Залежність монтажної ваги конструкції, що виготовляється методом гравітаційного видавлювання, від зміни її висоти в межах від 10 м до 50 м, при а — мінімальних інших розмірах конструкції ($a = 6$ м, $b = 0,4$ м); б — максимальних інших розмірах конструкції ($a = 18$ м, $b = 0,8$ м). 1 — залежність при $\rho_c = 1030$ кг/м³; 2 — залежність при $\rho_c = 1500$ кг/м³; 3 — область інших значень монтажної ваги при зміні густини розчину від 1030 кг/м³ до 1500 кг/м³.

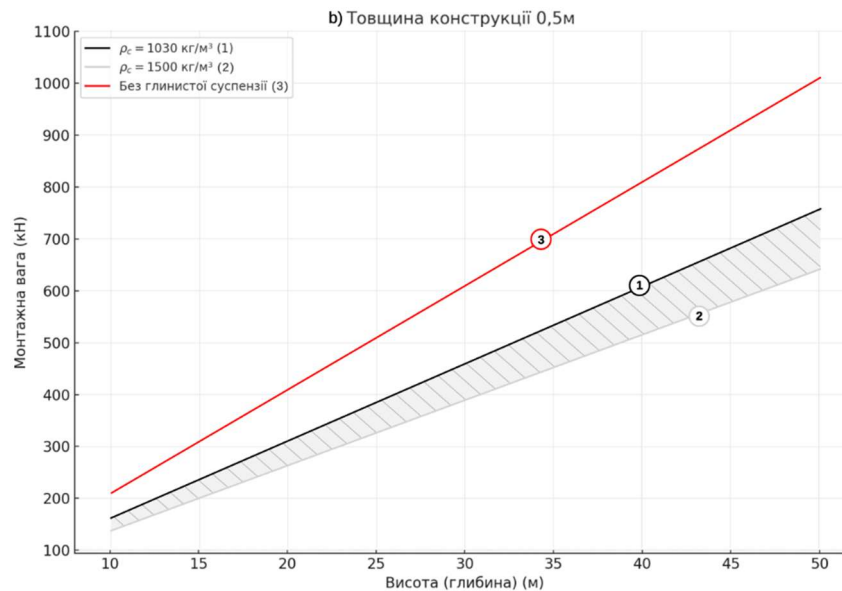
Було встановлено дві області залежностей: перша — при мінімальній довжині (a) і ширині (b) конструкції (рисунк 3.14, а), друга — при максимальній довжині (a) і ширині (b) конструкції (рисунк 3.14, б). Було розглянуто зміну монтажної ваги в інтервалі густин глинистої суспензії від 1030 кг/м^3 до 1500 кг/м^3 . В результаті було встановлено, що монтажна вага зростає до 80% при зміні висоти конструкції від 10 м до 50 м.

В рамках теоретичного дослідження було вивчено вплив виштовхувальної сили, що діє на конструкцію в рідинному середовищі (середовищі глинистого розчину) в процесі її виготовлення, на її монтажну вагу. Були розглянуті стінові конструкції, які виготовляються методом гравітаційного видавлювання, в інтервалі висоти від 10 м до 50 м. При цьому розглядались конструкції товщиною 0,4 м, 0,5 м, 0,6 м, 0,7 м і 0,8 м. Вплив виштовхувальної сили досліджувався для глинистих розчинів із густиною 1030 кг/м^3 , 1100 кг/м^3 , 1200 кг/м^3 , 1300 кг/м^3 , 1400 кг/м^3 і 1500 кг/м^3 . Для порівняння було розглянуто монтажну масу конструкції, на яку не впливає виштовхувальна сила, тобто, умовно, роботи виконуються у траншеї без застосування глинистого розчину.

За результатами дослідження були встановлені сукупності графічних залежностей зміни монтажної ваги стінової конструкції залежно від висоти конструкції (рисунк 3.15), при товщині конструкції $b = 0,4 \text{ м}$ (рисунк 3.15, а), $b = 0,5 \text{ м}$ (рисунк 3.15, б), $b = 0,6 \text{ м}$ (рисунк 3.15, в), $b = 0,7 \text{ м}$ (рисунк 3.15, г), $b = 0,8 \text{ м}$ (рисунк 3.15, д).

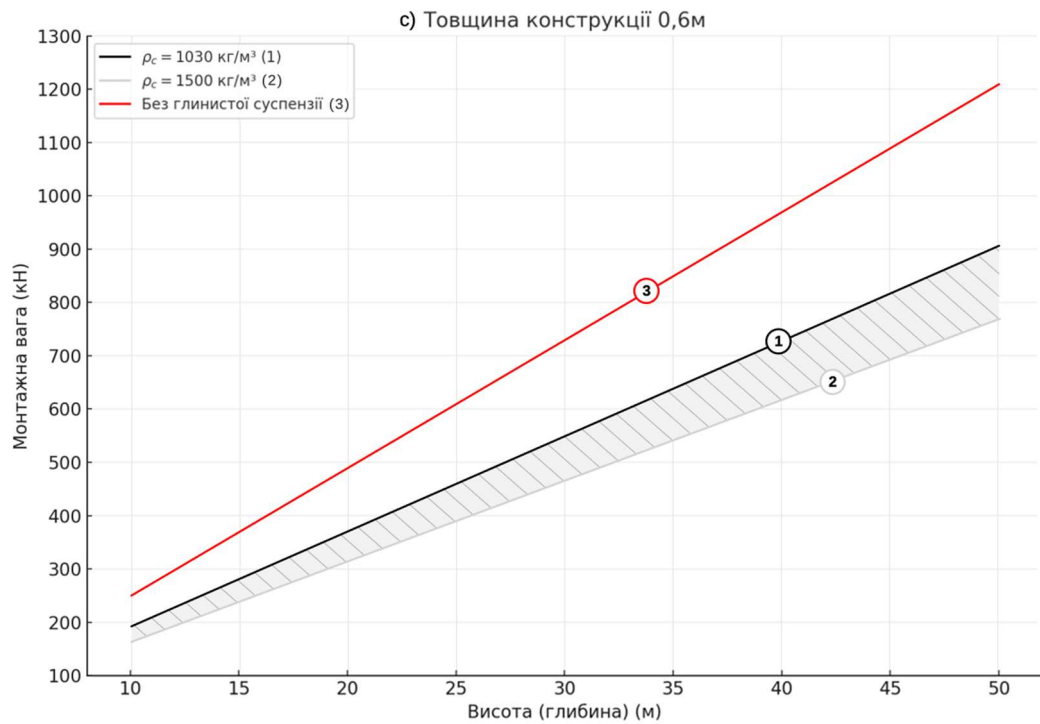


а

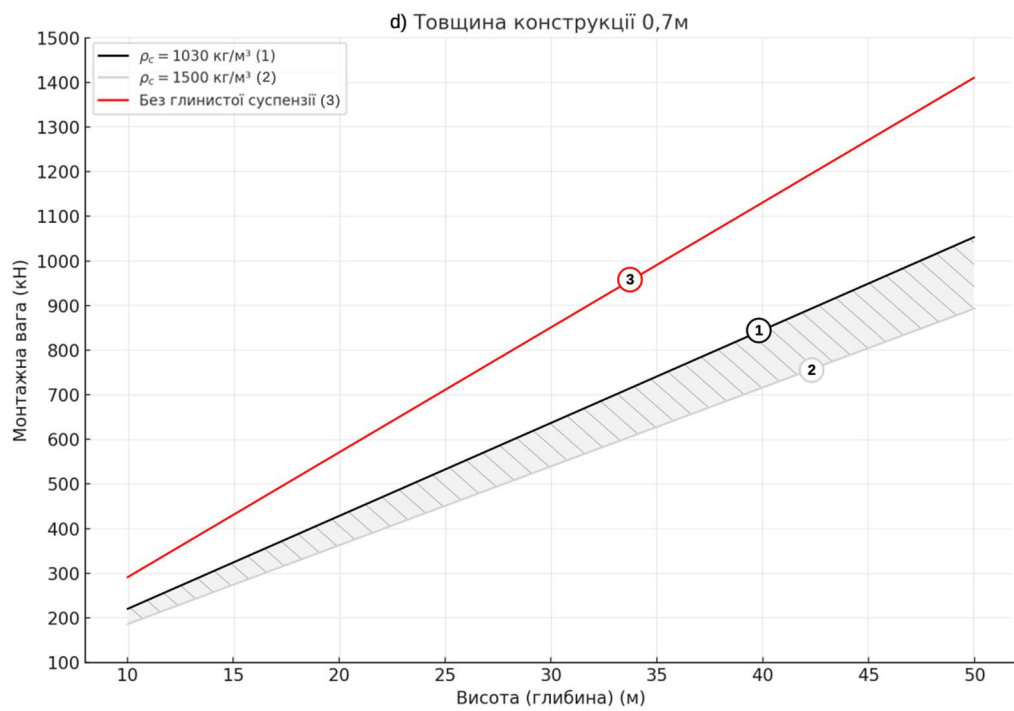


б

Рисунок 3.15 — Области зміни монтажної ваги конструкції в залежності від її висоти при різній товщині конструкції, де а — $b = 0,4$ м; б — $b = 0,5$ м; в — $b = 0,6$ м; г — $b = 0,7$ м; д — $b = 0,8$ м. 1 — залежність зміни монтажної ваги при густині розчину $\rho_c = 1030 \text{ кг/м}^3$; 2 — при $\rho_c = 1500 \text{ кг/м}^3$; 3 — у випадку, коли не застосовують глинистий розчин.

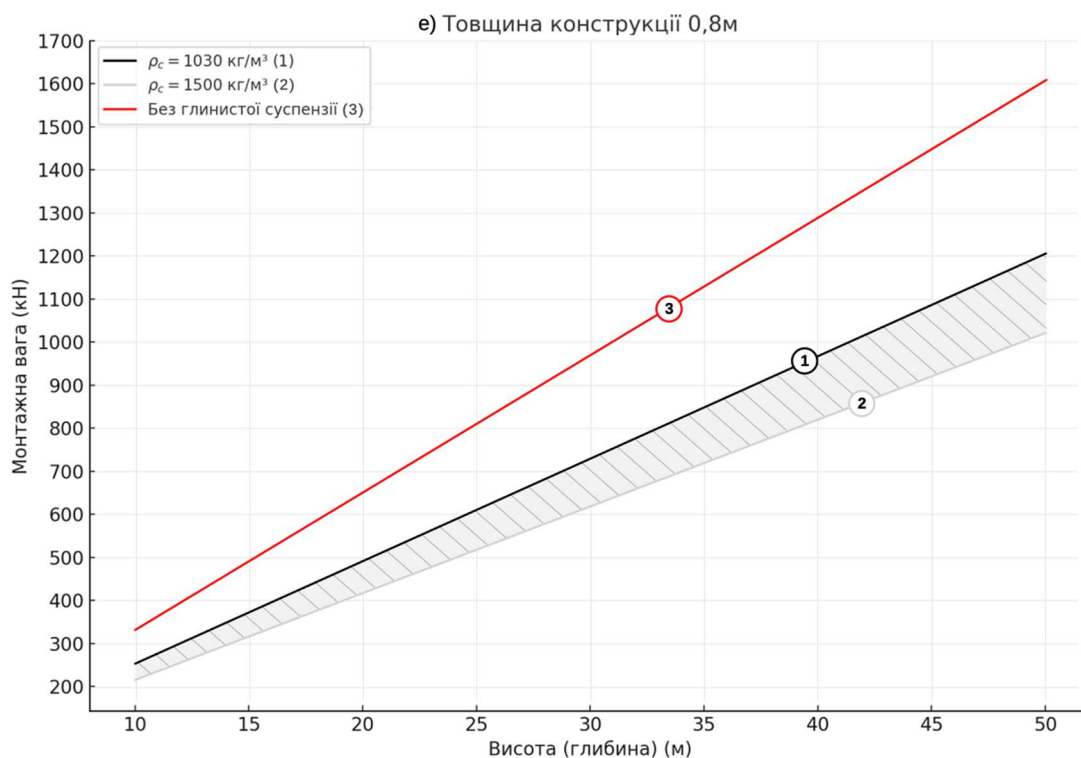


В



Г

Рисунок 3.15, аркуш 2



Д

Рисунок 3.15, аркуш 3

Були встановлені залежності зміни монтажної ваги стінової конструкції залежно від висоти конструкції при густинах глинистого розчину $\rho_c = 1030 \text{ кг/м}^3$ (залежність 1 на рисунку); $\rho_c = 1500 \text{ кг/м}^3$ (залежність 2 на рисунку). Для порівняння була визначена залежність монтажної ваги конструкції без впливу на неї глинистого розчину (залежність 3 на рисунку).

Аналіз отриманих результатів виявив, що збільшення густини глинистого розчину зменшує монтажну вагу конструкції, яку зводять методом гравітаційного видавлювання. Це можна пояснити тим, що глинистий розчин створює додаткову плавучість конструкції, що частково компенсує її вагу згідно із законом Архімеда. Так, при густині глинистого розчину 1500 кг/м^3 (залежність 2 на рисунку), вага конструкції зменшується значно більше при різних товщинах конструкції, ніж при густині глинистого розчину 1030 кг/м^3 (залежність 1 на рисунку). А тому збільшення густини глинистого розчину на

етапі опускання конструкції до траншеї дозволить частково зменшити її монтажну вагу і, відповідно, навантаження підтримувальні конструкції.

За результатами теоретичного дослідження, що виконувалось методом математичного моделювання встановлено наступне [93]. При мінімальних значеннях інтервалу розглянутих факторів (довжина конструкції $a = 6$ м, ширина $b = 0,4$ м, висота $h = 10$ м) монтажна вага конструкції, яку виготовляють методом гравітаційного видавлювання, становить 617,4 кН, а при максимальних значеннях (довжина $a = 18$ м, ширина $b = 0,8$ м, висота $h = 50$ м) зростає до 21500,7 кН. Таким чином, монтажна вага коливається в межах від 617,4 кН до 21500,7 кН залежно від розмірів конструкції. При цьому був виявлений вплив на монтажну вагу конструкції густини глинистого розчину, який застосовують для стабілізації стінок траншеї на період виконання робіт. Тому застосування глинистого розчину мінімальної густини (1,03 т/м³) дозволяє зменшити монтажну вагу лише до 25 %, але збільшення густини глинистого розчину дозволяє значно зменшити монтажну вагу конструкції. Так, при густині глинистого розчину 1,5 т/м³ зменшення ваги конструкції може досягати до 37%. Це вказує на те, що на етапі опускання стінової конструкції у траншею потрібно збільшити густину глинистого розчину для зменшення монтажної ваги конструкції, що в свою чергу дозволить зменшити навантаження на підтримувальні конструкції системи гравітаційного видавлювання.

Зміна геометричних параметрів конструкції також суттєво впливає на її монтажну вагу. Зокрема, збільшення довжини конструкції в діапазоні від 6 м до 18 м може призвести до зростання монтажної ваги до 67%, збільшення ширини конструкції з 0,4 м до 0,8 м спричиняє підвищення монтажної ваги до 50 %, а зміна висоти конструкції в діапазоні від 10 м до 50 м може призвести до зростання монтажної ваги до 80%. Ці результати підкреслюють важливість оптимізації розмірів стінової конструкції для забезпечення мінімального навантаження на систему гравітаційного видавлювання.

3.4 Дослідження меж можливостей застосування технології гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій підземних споруд

Було узагальнено результати аналізу чотирьох ключових критеріїв (тривалості виконання робіт відносно параметру стійкості траншеї, продуктивність, трудомісткість, собівартість) та виділено глибини, в межах яких метод залишається ефективним без додаткових заходів адаптації.

Межа стійкості траншеї за тривалістю робіт. Математичне моделювання показало, що сумарний час виконання всіх етапів зростає лінійно з глибиною. Порівняння цієї залежності з умовною межею стійкості траншеї демонструє, що для глибин до 20 м сумарна тривалість ще не перевищує 48 годин, хоча верхня межа діапазону наближається до критичного рівня. Починаючи з 25 м, обидві межі тривалості виходять за рамки безпечного інтервалу, а при діапазоні від 30 м до 50 м — збільшується ризик обвалу траншеї (рисунок 3.5).

Межа продуктивності. Продуктивність основного циклу (безперервного бетонування-опускання) залежить від глибини занурення та швидкості опускання. На малих глибинах від 5 м до 10 м вона становить лише в межах від 2 м³/добу до 4 м³/добу через великий відсоток підготовчих операцій, тоді як від 20 м до 30 м — зростає до діапазону від 6 м³/добу до 8 м³/добу. Таким чином, лише при глибинах ≥ 20 м технологія виходить на проєктну потужність і стає конкурентоспроможною з точки зору продуктивності, порівнюючи зі зведенням підземних стінових конструкцій методом «стіна в ґрунті» (рисунок 3.9).

Межа економічної доцільності (собівартість). Аналіз собівартості 1 м² показав, що при невеликих глибинах (від 5 м до 10 м) собівартість гравітаційного видавлювання перевищує традиційний метод «стіна в ґрунті» через умовно-фіксовані витрати на опалубку та організацію. Криві собівартості зрівнюються біля меж від 12 м до 15 м, а при глибині понад 15 м

витрати за гравітаційним методом уже менші (економія від 8 % до 10 % при 30 м) (рисунок 3.11).

Накладення вищезгаданих меж за тривалістю, продуктивністю та собівартістю дозволяє виділити оптимальний діапазон глибин від 15 м до 25 м (рисунок 3.16). Нижня межа (15 м) детермінована економічною доцільністю (собівартість), верхня (25 м) — граничною стійкістю траншеї за тривалістю та досягнутою продуктивністю. За глибин від 25 м метод залишається конкурентним, але вже потребує технологічних заходів для збереження безпеки та ефективності.

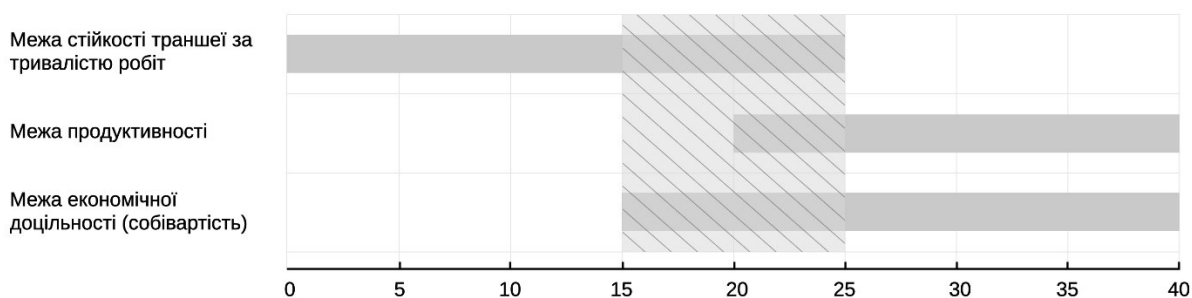


Рисунок 3.16 — Діаграма меж можливостей застосування технології гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій підземних споруд

Таким чином, межі безумовного застосування технології гравітаційного видавлювання для підземних армобетонних стінових конструкцій закладаються в інтервалі від 15 м до 25 м, що відповідає одночасному виконанню вимог до стійкості, продуктивності та економічності. За більших глибин необхідна адаптація технологічних параметрів.

Висновки до третього розділу

1. Математичне моделювання показало, що сумарна тривалість етапів t_6 , t_7 , t_8 , t_9 , t_{10} та t_{11} лінійно залежить від глибини траншеї. Якщо при глибині 10 м загальна тривалість становить від 35 до 37 годин, то при 20 м вона зростає до діапазону від 43 до 53 годин. Найбільший внесок у загальну тривалість робить

етап безперервного бетонування наступних ярусів (t_{10}), який найбільше реагує на зміну глибини. Збільшення глибини на кожні 5 м додає в середньому від 8 до 16 годин до загального часу. Порівняння результатів з умовною межею стійкості траншеї (48 годин) показує, що без додаткових інженерних заходів технологія може бути реалізована до глибини близько 20 м. Понад цей поріг ризик втрати стійкості конструкції зростає, а при діапазоні від 30 м до 50 м перевищення стає критичним. Аналіз продуктивності показав, що монтаж системи гравітаційного видавлювання виконується зі швидкістю близько 1,5 м на годину. Бетонування першого ярусу конструкції із типовими розмірами займає орієнтовно 2 години. Етап безперервного бетонування в середньому забезпечує швидкість 7 м опускання на добу, що дозволяє повністю завершити процес при глибинах до 20 м у межах допустимого часу. Інші етапи, як-от розблокування опорної балки чи фіксація конструкції, мають стабільну тривалість (від 1 до 4 годин) і не залежать від глибини, тому їхній вплив на загальну тривалість є мінімальним.

2. У результаті аналізу трудомісткості було встановлено, що найбільш ресурсозатратним етапом є процес безперервного бетонування з одночасним опусканням конструкції до траншеї — на нього припадає до 73 % загального обсягу трудових витрат. Загальний показник трудомісткості зростає зі збільшенням глибини, однак його структура залишається стабільною. Оцінка собівартості показала, що при глибинах до 15 м технологія гравітаційного видавлювання поступається за економічними показниками традиційній технології «стіна в ґрунті» через фіксовані витрати на монтажні й підготовчі операції. Проте, починаючи з глибин понад 15 м, спостерігається зниження собівартості порівняно з методом «стіна в ґрунті», що свідчить про доцільність використання гравітаційного видавлювання у глибших підземних конструкціях.

3. Виконано комплексний аналіз монтажної ваги конструкції, тривалості технологічних етапів та продуктивності при застосуванні методу гравітаційного видавлювання для зведення стінових конструкцій підземних

споруд. Розрахунки показали, що монтажна вага конструкції істотно залежить від її геометричних параметрів: при збільшенні довжини від 6 м до 18 м вага зростає до 67 %, при збільшенні товщини від 0,4 м до 0,8 м — до 50 %, а при нарощуванні висоти від 10 м до 50 м — до 80 %. Водночас густина глинистої суспензії впливає на монтажну вагу в межах від 25 % до 37 %, що відкриває можливості технологічного регулювання навантаження шляхом підбору складу розчину.

4. На основі порівняльного аналізу тривалості виконання робіт, продуктивності та собівартості, було визначено діапазон глибин, у межах якого технологія гравітаційного видавлювання є найбільш ефективною. Оптимальний інтервал становить від 15 м до 25 м, де досягається прийнятний баланс між безпечним часом стабільності траншеї, високою продуктивністю бетонування та доцільною собівартістю конструкції. За межами цього інтервалу (особливо при глибинах понад 25 м) виникає потреба в адаптації технологічних рішень, таких як застосування швидкотверднучих сумішей або зміцнення стінок траншеї. Таким чином, межі доцільного застосування технології окреслено в діапазоні від 15 м до 25 м, що дозволяє забезпечити стабільну якість виконання та економічну ефективність.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНОЛОГІЯ ГРАВІТАЦІЙНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПІДЗЕМНИХ СТІНОВИХ АРМОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

4.1 Методика проєктування технології гравітаційного видавлювання підземних стінових армобетонних споруд

Проектування технології виготовлення конструкції методом гравітаційного видавлювання потребує розробки окремої методики, яка б враховувала специфіку цього процесу та відмінність від традиційних будівельних технологій, зокрема від класичних методів влаштування стін у ґрунті чи спорудження конструкцій у відкритому котловані. Запропонована методика покликана забезпечити єдиний підхід до формування технічних рішень при реалізації гравітаційного способу занурення армобетонної конструкції в раніше влаштовану траншею.

Основне призначення методики полягає у систематизації технологічних, конструктивних й організаційних рішень, що забезпечують ефективне, безпечне та якісне виготовлення підземної залізобетонної конструкції у складних геотехнічних умовах. Методика охоплює ключові рішення на етапі підготовки, розроблення траншеї, монтажу модульної форми, бетонування та керованого опускання конструкції.

Мета методики — сформувати базу для створення проєктної документації, що забезпечує:

- геометричну точність та вертикальність опускання конструкції;
- узгодженість дій між етапами бетонування, армування та опускання;
- адаптацію технології до конкретних геологічних, гідрогеологічних і просторових умов;
- оптимізацію витрат матеріалів, трудових ресурсів і машинного часу;
- гарантії тріщиностійкості, водонепроникності та довговічності готової конструкції.

Методика є вихідною основою для подальшої розробки технологічного регламенту, а також для визначення технічних параметрів і допусків, які повинні бути враховані на стадії проєктування та реалізації будівельних робіт. Її застосування дозволяє уніфікувати процеси, забезпечити повторюваність результатів та інтегрувати дану технологію у загальний комплекс підземного будівництва.

Вихідні умови проєктування. Ці умови визначають основні фактори, які впливають на вибір технічних рішень при застосуванні технології гравітаційного видавлювання. Формування проєктної схеми виконання робіт можливе лише після ретельного аналізу сукупності інженерно-геологічних, конструктивних, організаційних та просторових параметрів будівельного майданчика.

До переліку основних вихідних умов належать:

- геометричні характеристики конструкції;
 - 1) товщина конструкції;
 - 2) проєктна глибина конструкції (висота конструкції);
 - 3) проєктна довжина конструкції;
 - 4) наявність конструктивних елементів, що перешкоджають безперервному зануренню (відкоси, закладні деталі, прорізи тощо);
- інженерно-геологічні та гідрогеологічні умови;
 - 1) тип і структура ґрунтів;
 - 2) рівень ґрунтових вод та фільтраційні характеристики;
 - 3) наявність перешкод у ґрунтовому масиві (валуни, залишки старих фундаментів, комунікації);
- просторові обмеження будівельного майданчика;
 - 1) щільність міської забудови;
 - 2) наявність споруд в безпосередній близькості;
 - 3) доступність для підйомно-транспортного обладнання;

- 4) можливість організації робочого майданчика для монтажу модуль-форми та зони бетонування;
- експлуатаційні вимоги до конструкції;
 - 1) несуча здатність;
 - 2) вимоги водонепроникності;
 - 3) клас бетону та арматури;
 - 4) вимоги до якості зовнішньої поверхні стіни;
- організаційно-технологічні обмеження;
 - 1) доступність матеріалів і механізмів на місці;
 - 2) продуктивність бетонного вузла;
 - 3) технічна можливість синхронного керування системою лебідок.

Логіко-структурна модель процесу гравітаційного видавлювання конструкції (ієрархічна структура етапів). Моделювання процесу виготовлення конструкції методом гравітаційного видавлювання виконано шляхом декомпозиції всіх операцій на взаємопов'язані етапи, що відображають послідовність і взаємозв'язки між ними. В основу побудови моделі покладено системний підхід: процес розглядається як система, що складається з ряду компонентів (операцій), об'єднаних спільною метою та логічними зв'язками (рисунок 4.1). Це дозволяє досягнути структуру технології від підготовчих робіт до завершальних заходів та забезпечити класифікацію процесів за їх призначенням і характером виконання.

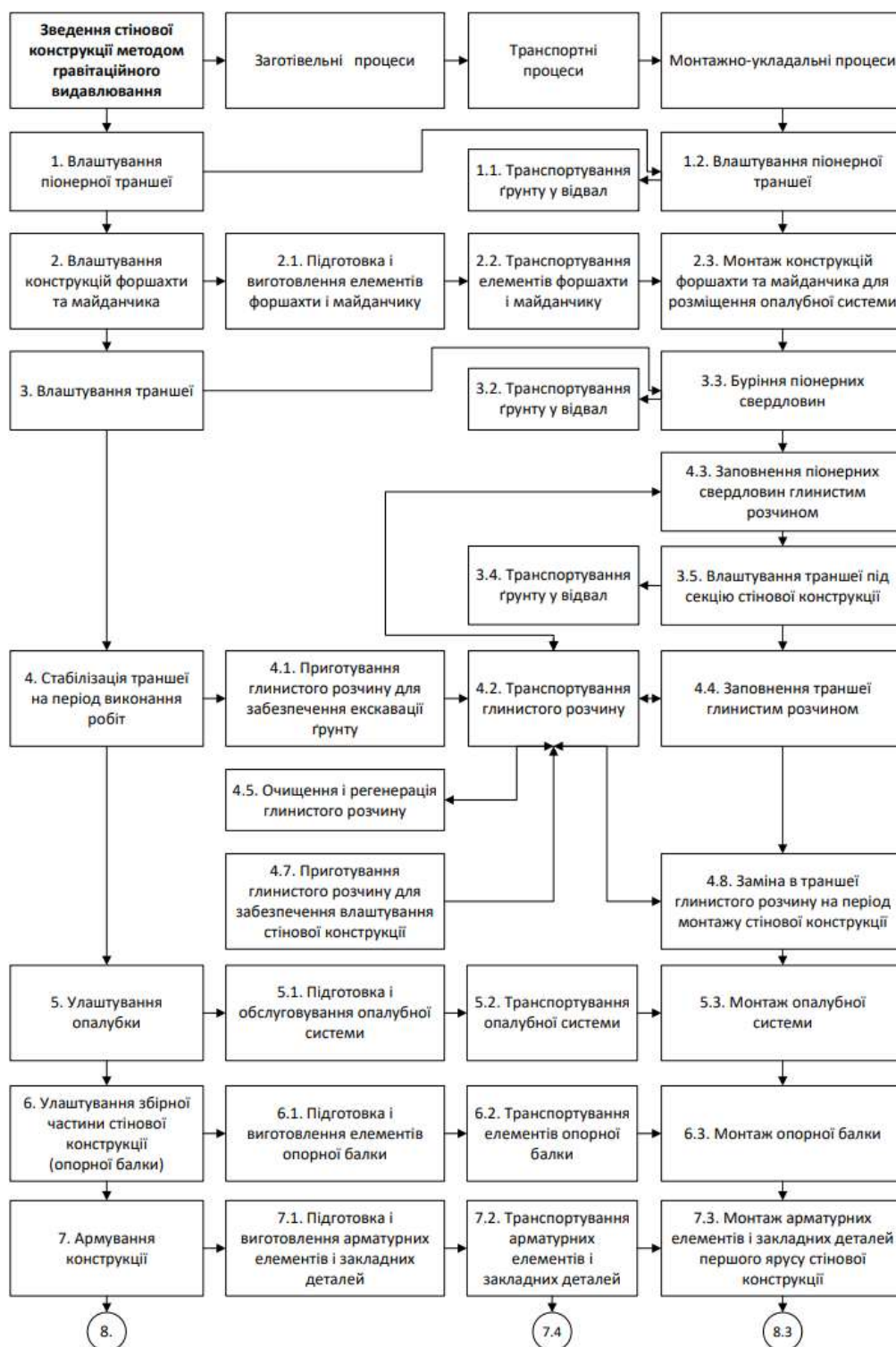


Рисунок 4.1 — Узагальнена структура процесу виготовлення підземної конструкції методом гравітаційного видавлювання

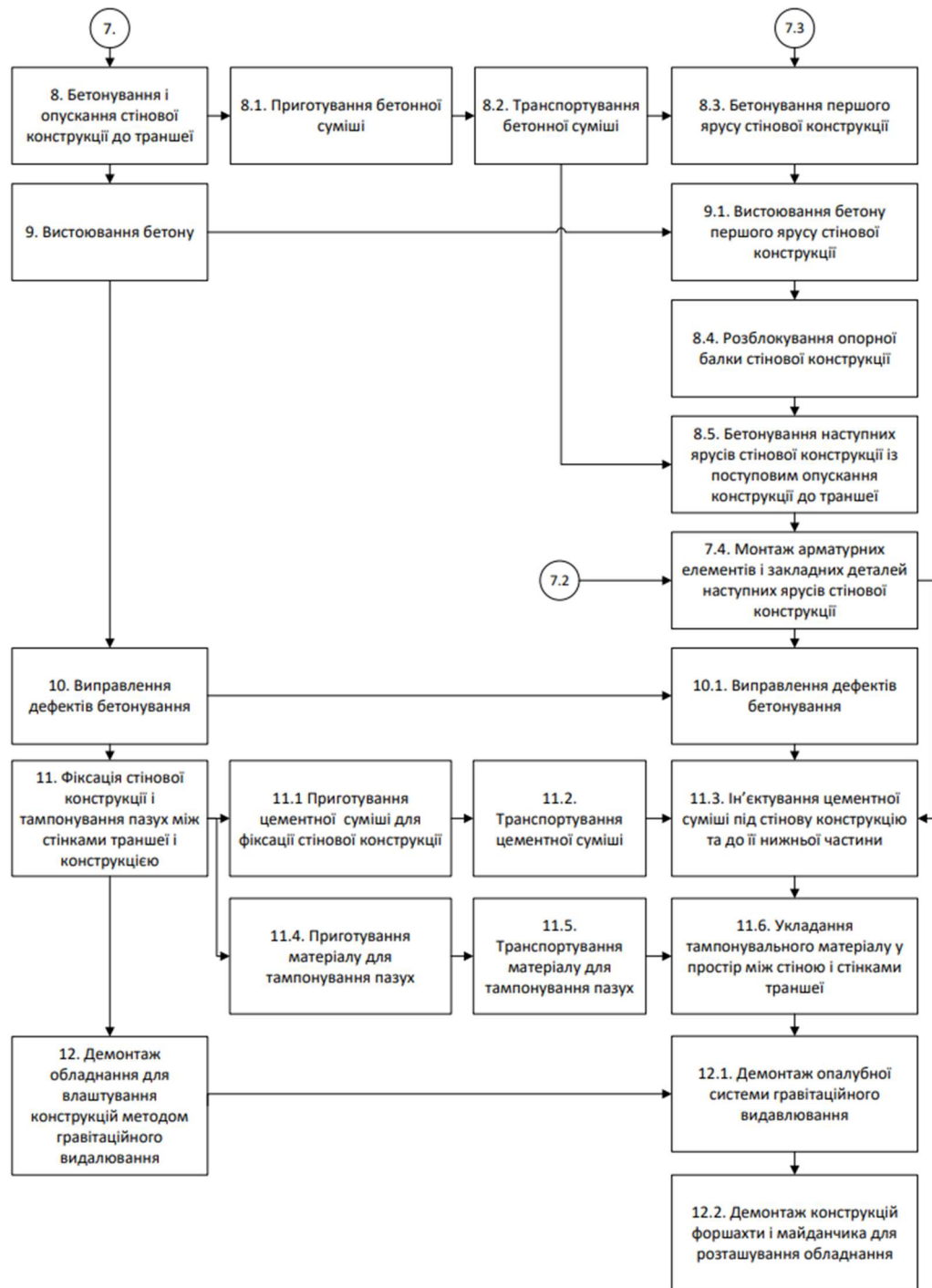


Рисунок 4.1, аркуш 2

У результаті аналізу технології були визначені основні групи операцій, які доцільно виділити в моделі. З точки зору організації будівельного виробництва процес гравітаційного видавлювання можна поділити на підготовчі, основні та завершальні. Підготовчі процеси забезпечують створення необхідних умов для основного циклу робіт. До них відносяться, зокрема, розроблення піонерної траншеї та влаштування форшахти (верхнього

укріплення стінок траншеї), а також монтаж необхідного обладнання й армовидавлювальної системи (модуль-форми) на підготовленому майданчику. Основні (технологічні) процеси включають безпосереднє формування конструкції методом гравітаційного видавлювання, а саме виїмку ґрунту на проєктну глибину під захистом глинистого розчину, установку та фіксацію армовидавлювальної системи, виготовлення і монтаж арматурного каркасу, укладання бетонної суміші та її ущільнення, а також одночасне бетонування і опускання конструкції. Завдяки масі споруди бетонована частина конструкції поступово занурюється у ґрунт до проєктного положення під дією власної ваги, тоді як зверху триває нарощування наступних ярусів арматури й бетону. Таким чином, відбувається синхронізований процес: після набору міцності чергового шару бетону знімаються тимчасові фіксатори та здійснюється контрольоване опускання конструкції, та паралельно виконується нарощування арматурного каркасу і подальше безперервне бетонування до досягнення проєктної позначки. Завершальні процеси включають операції, що виконуються після того, як конструкція досягла проєктного рівня у ґрунті. Зокрема, через спеціальну ін'єкційну трубу під тиском подається дрібнозернистий розчин (тонкозернистий бетон) для створення підшви конструкції внизу траншеї, яка додатково фіксує споруду в ґрунті. Після цього опалубна система демонтується, а утворений кільцевий простір між стінками траншеї та бетонною конструкцією заповнюється ґрунтом або іншим матеріалом до повного контакту з конструкцією. В результаті виконання завершальних операцій з формування армобетонної конструкції методом гравітаційного видавлювання процес вважається закінченим.

Модель має деревоподібну структуру і відображає взаємозв'язок між описаними групами процесів (рисунок 4.1). Верхній рівень діаграми відповідає повному процесу зведення конструкції та поділяється на три основні етапи: підготовчий, основний та завершальний. На наступному рівні деталізації кожен з цих етапів розгорнутий на складові операції. Зокрема, підготовчий етап включає роботи з підготовки котловану (піонерна траншея),

облаштування форшахти (кріплення стінок траншеї) та встановлення елементів настилу і обладнання для опускання конструкції. Основний етап містить ключові технологічні процеси: розроблення ґрунту на глибину споруди із застосуванням глинистого розчину, монтаж і фіксацію ковзної опалубки (спеціальної опалубної системи), формування першого ярусу армобетонної конструкції (армування та бетонування стартової ділянки) та безперервний процес нарощування конструкції з одночасним опусканням. Завершальний етап на рисунку 4.1 представлений операціями з формування нижньої бетонної підготовки (для закріплення конструкції у ґрунті), демонтажу опалубної системи та заповнення пазух траншеї (простору між конструкцією і ґрунтом) інертним матеріалом після опускання споруди. Логіко-структурна модель чітко показує послідовність виконання робіт і взаємозв'язки між ними: більшість підготовчих операцій мають бути виконані до початку основного етапу, тоді як частина процесів основного етапу відбувається паралельно або циклічно. Наприклад, бетонування конструкції та її опускання не розділені в часі, а здійснюються як єдиний цикл із повторюваними кроками. Така наочна структуризація процесу дозволяє краще зрозуміти технологію гравітаційного видавлювання і слугує основою для подальшого аналізу ефективності та можливих удосконалень.

Основні етапи технологічного процесу. Технологія гравітаційного видавлювання армобетонних конструкцій передбачає реалізацію чітко структурованої послідовності етапів, кожен з яких вимагає окремих проєктних рішень, підготовчих заходів та інженерного забезпечення. Правильне поетапне планування дозволяє забезпечити безперервність технології, якість виготовлення конструкції, а також її точне розташування в просторі.

У межах методики до основних етапів процесу виготовлення конструкції належать:

– влаштування траншеї під глинистим розчином;

1) буріння пілотних свердловин по кутах контуру;

- 2) розробка траншеї грейферним обладнанням з одночасним заповненням її глинистим розчином;
 - 3) рециркуляція та очищення суспензії, заміна її на розчин більшої густини після формування траншеї (за потреби);
- монтаж армовидавлювальної системи (рисунок 4.2);
- 1) підготовка форшахти;
 - 2) монтаж армовидавлювальної системи;
 - 3) монтаж лебідок і натяг металевих канатів, які з'єднуються з опорною балкою;
 - 4) встановлення та закріплення опорної балки;

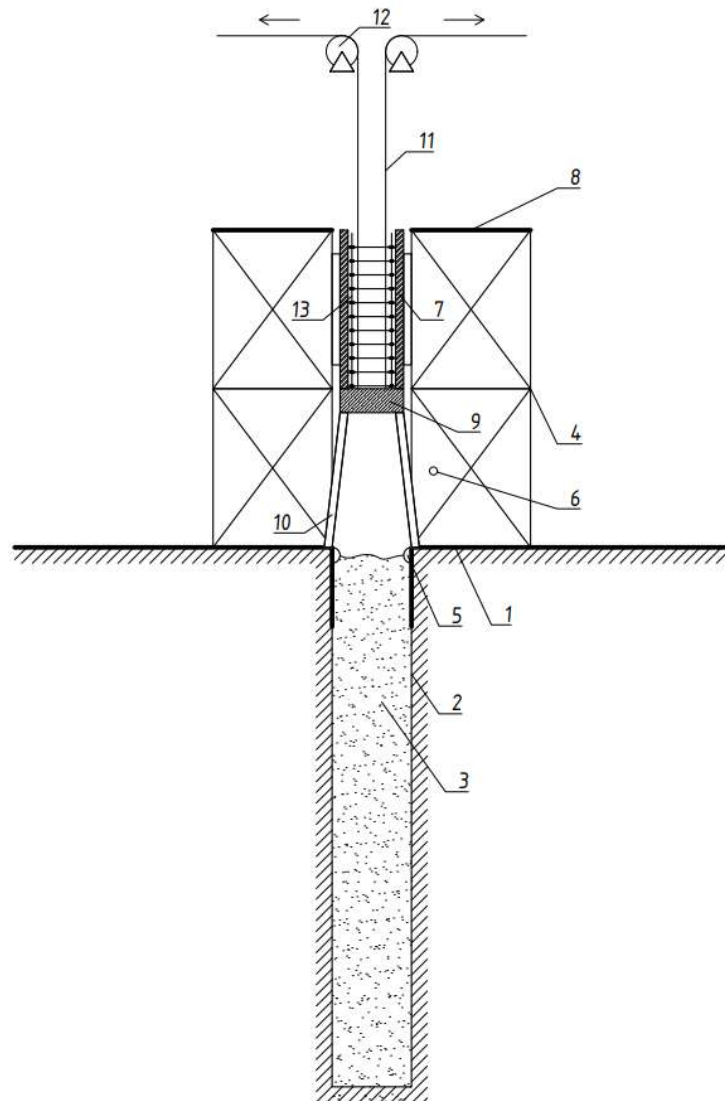


Рисунок 4.2 — Монтаж армовидавлювальної системи (модуль-форми)

- укладання бетонної суміші та армування першого ярусу (рисунок 4.3);
 - 1) встановлення арматурного каркасу в опалубку першого ярусу;
 - 2) укладання бетонної суміші з вібруванням;
 - 3) витримка до початку схоплювання для забезпечення формостійкості конструкції;

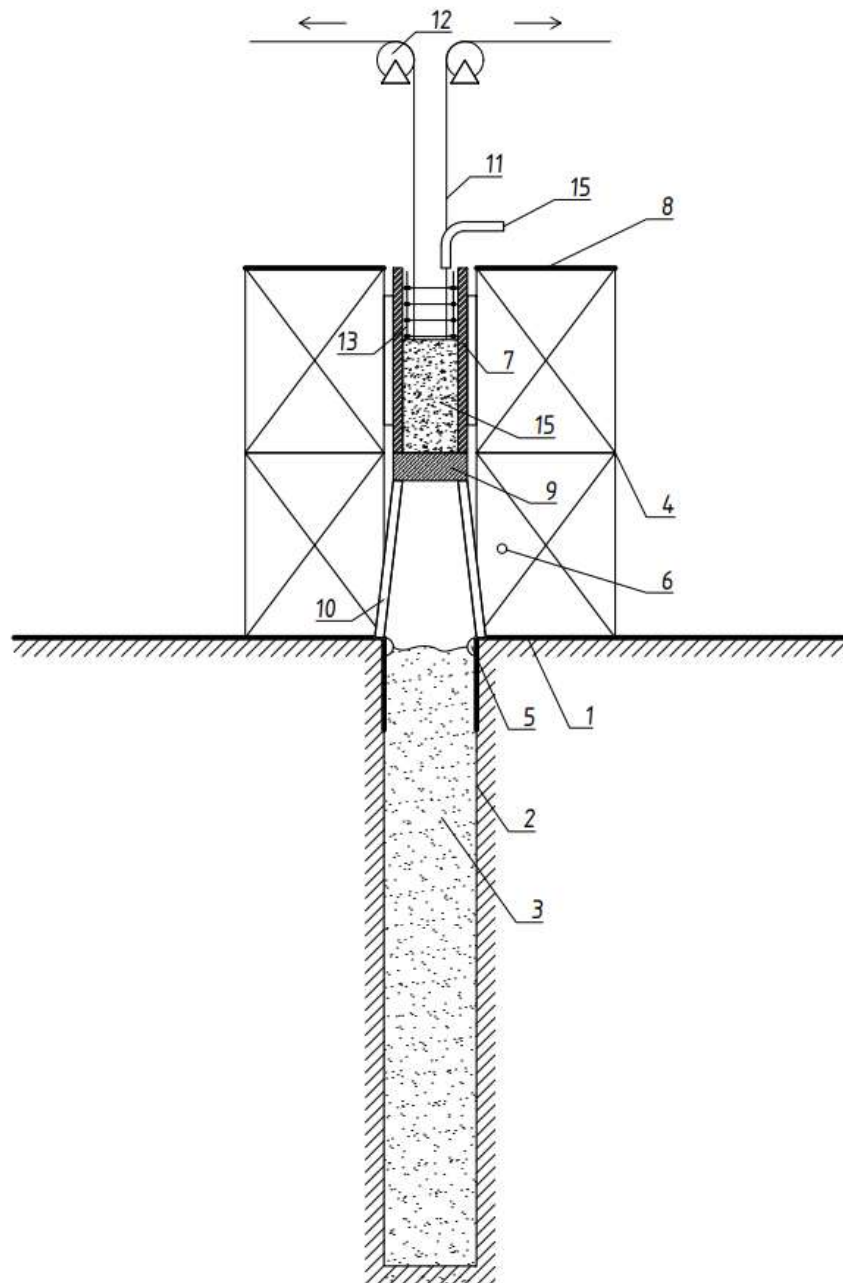


Рисунок 4.3 — Укладання бетонної суміші та армування
першого ярусу

- безперервне бетонування та опускання конструкції (рисунок 4.4);
 - 1) початок синхронного опускання конструкції;
 - 2) пошарове бетонування та нарощування арматури у модуль-формі;
 - 3) контроль швидкості занурення та вертикальності стінки;
 - 4) здійснення коригувальних операцій у разі виявлення відхилень;

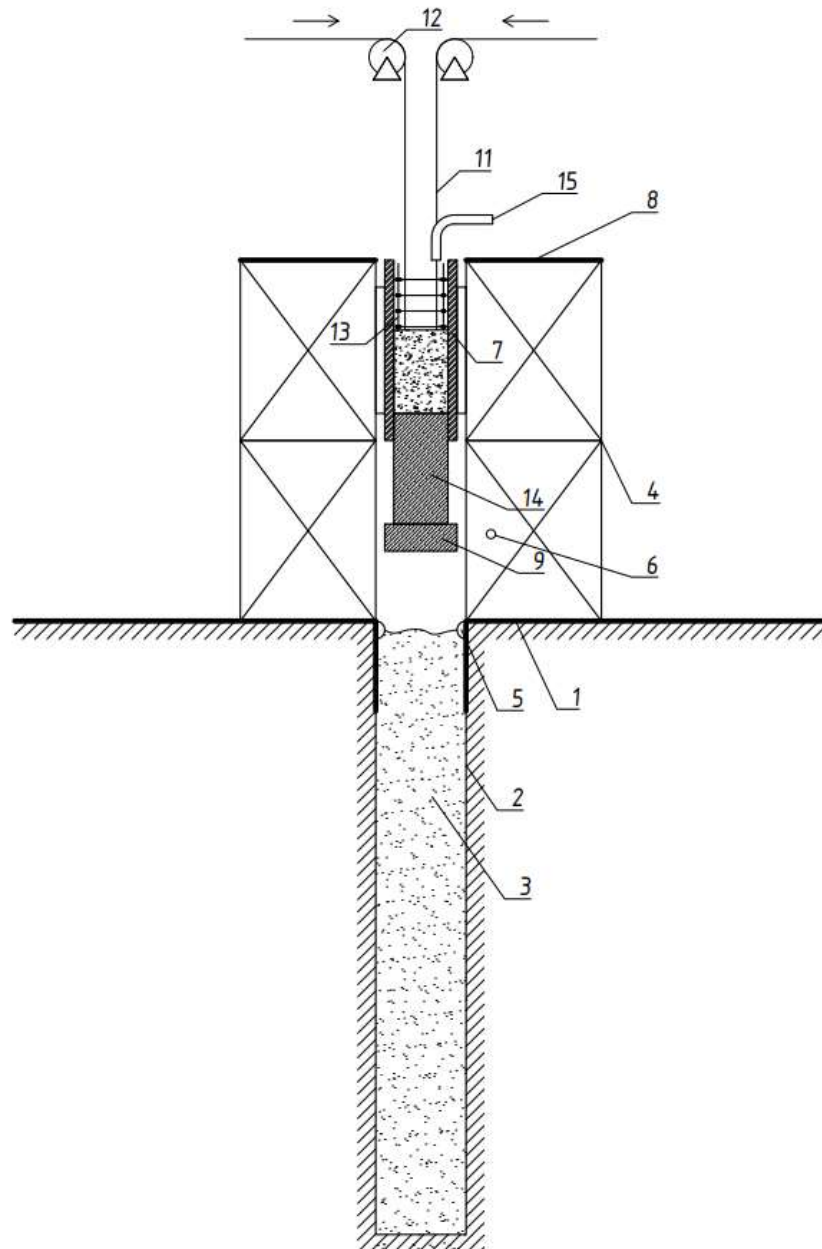


Рисунок 4.4 — Безперервне бетонування та опускання конструкції

- фіксація конструкції та завершальні операції (рисунок 4.5);
 - 1) зупинка лебідок після досягнення проєктної глибини;
 - 2) засипка отворів між траншеєю та конструкцією тампонажним матеріалом (за необхідності);
 - 3) тимчасова фіксація конструкції до моменту набору розрахункової міцності;
 - 4) демонтаж опалубних модулів і лебідкової системи (рисунок 4.6).

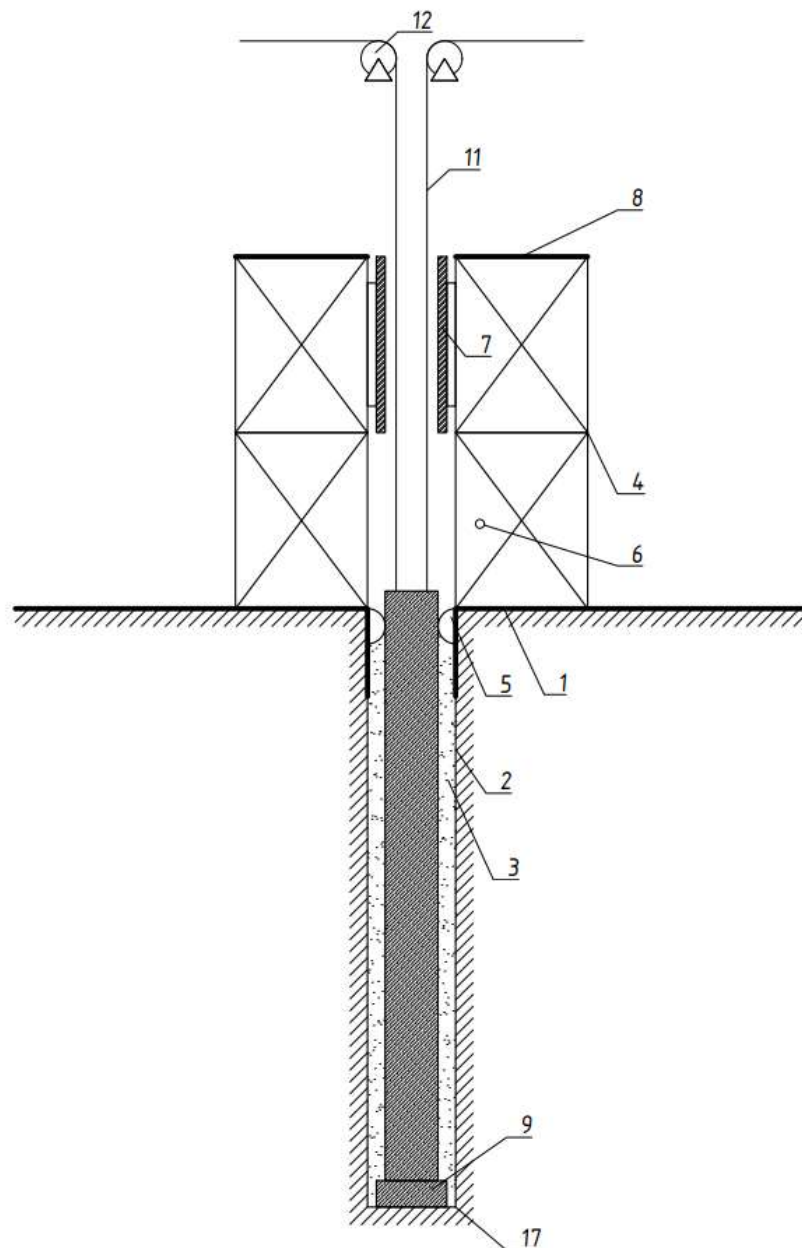


Рисунок 4.5 — Фіксація конструкції в проєктному положенні

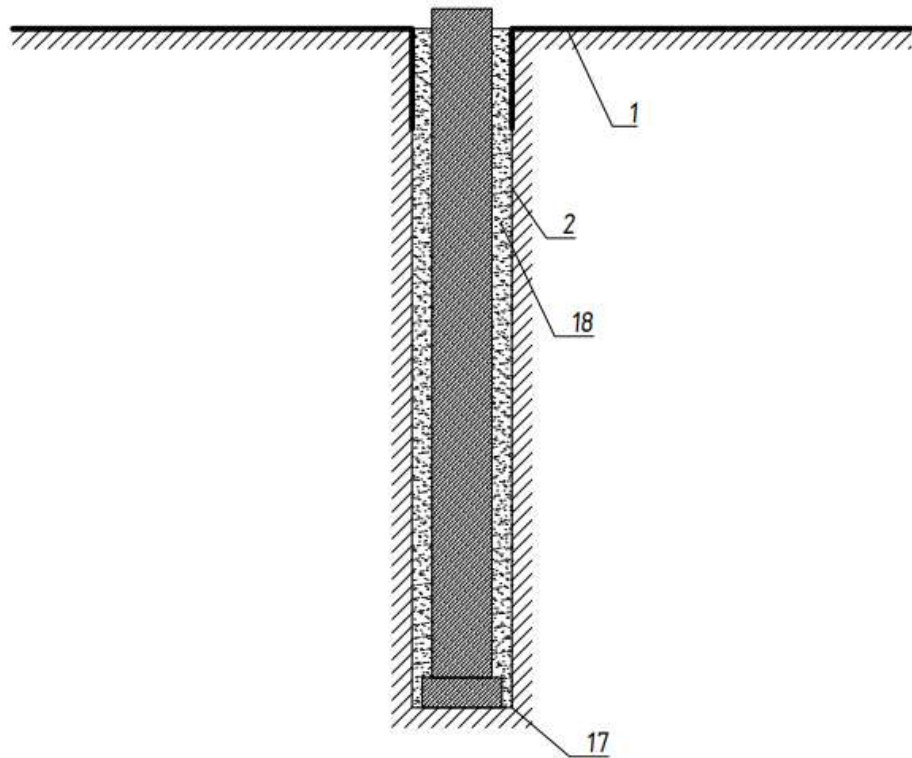


Рисунок 4.6 — Демонтаж опалубних модулів і лебідкової системи

4.2 Рекомендації до технології виготовлення конструкцій методом гравітаційного видавлювання

За результатами проведених досліджень встановлено, що метод гравітаційного видавлювання доцільно застосовувати в підземному будівництві для масивних заглиблених конструкцій, зокрема, в проєктах метрополітену, колекторів, глибоких фундаментів, тунелів та гідротехнічних споруд. Ця технологія особливо ефективна при значних глибинах занурення конструкцій, де її переваги проявляються у скороченні тривалості виконання робіт та зниженні вартості. Розрахунки техніко-економічних показників показали, що після певного порогового значення глибини (приблизно від 12 м до 15 м) собівартість виготовлення підземної стінки методом гравітаційного видавлювання зрівнюється з традиційною технологією, а при подальшому збільшенні глибини навіть зменшується. Зокрема, для глибини 20 м економія може становити близько 6 %, а при 30 м — від 8 % до 10 % у порівнянні з умовною альтернативою. Натомість на невеликій глибині дана технологія

менш рентабельна через вплив фіксованих підготовчих витрат (монтаж опалубки тощо), які суттєво підвищують кошторис при малому обсязі бетонування. Отже, метод гравітаційного видавлювання рекомендується впроваджувати переважно для глибоких підземних конструкцій, де значні обсяги бетонних робіт забезпечують ефективність безперервного процесу та виправдовують початкові витрати.

Важливо відзначити технологічні та конструктивні переваги гравітаційного видавлювання, що позитивно впливають на ефективність будівництва. Швидкість укладання бетону при цьому методі не поступається традиційним підходам, а головне, що процес бетонування є безперервним по всій висоті стінки. Конструкція виготовляється як єдиний моноліт без горизонтальних робочих швів. Така безперервність не лише прискорює зведення стін (оскільки виключаються технологічні простої на стику секцій), але й підвищує якість та монолітність підземної конструкції. Відсутність швів між окремими частинами стінки підвищує її водонепроникність та несучу здатність, що є вагомим перевагою для підземних об'єктів, що піддаються впливу ґрунтових вод або значних навантажень. Таким чином, метод гравітаційного видавлювання забезпечує високі темпи бетонування і отримання суцільної армобетонної конструкції, що було однією з головних цілей його впровадження.

Для успішного застосування технології важливо обґрунтувати оптимальні геометричні параметри секцій, що виготовляються методом гравітаційного видавлювання. Моделювання показало, що діапазон можливих розмірів є досить широким: розглядалися довжини секції від приблизно 6 м до 18 м, товщина (ширина стінки) від приблизно 0,4 м до 0,8 м та глибина занурення від 10 м до 50 м. Мінімальна конфігурація (довжина близько 6 м, товщина 0,4 м, глибина близько 10 м) матиме вагу приблизно від 600 кН до 960 кН, тоді як максимальні розміри (довжина близько 18 м, товщина 0,8 м, глибина близько 50 м) призводять до різкого зростання маси конструкції — від 20 000 кН до 28 000 кН і більше. Надмірне збільшення габаритів секції

ускладнює процес її опускання та потребує значних зусиль для підтримання конструкції. Тому на практиці рекомендується обирати помірні розміри елементів: товщину стінки на рівні від 0,4 м до 0,6 м (достатню для забезпечення міцності та маси конструкції, але без зайвого перевантаження), а глибину виготовлення однієї секції планувати в межах від 15 м до 25 м. Збільшення розмірів понад наведені значення слід здійснювати обережно, ураховуючи прогресуюче зростання маси й впливів на стійкість траншеї та технологічне оснащення.

Ключовою умовою успішного виготовлення конструкцій методом гравітаційного видавлювання є забезпечення стійкості стінок відкритої траншеї протягом усього циклу бетонування та опускання секції. Розрахункова тривалість процесу залежить від глибини: із її збільшенням час виконання операцій лінійно зростає. Встановлено, що сумарна тривалість виготовлення стінки може досягати від 35 до 50 годин для глибин порядку від 10 м до 20 м, що є прийнятним, проте при 30 м і більше загальний час перевищує критичну межу стійкості стінок траншеї. Орієнтовно без додаткових інженерних заходів технологію можна безпечно реалізувати до глибини приблизно 20 м протягом близько 48 годин, оскільки саме стільки часу забезпечується стійкий стан траншеї під захистом глинистого розчину нормальної густини. У випадку більших глибин (від 25 м до 30 м і більше) ризик обвалення стінок різко зростає, оскільки час опускання перевищує 2 доби, настає розмив або послаблення ґрунту, що може спричинити аварійну ситуацію. Таким чином, при глибинах понад приблизно 20 м необхідно впроваджувати спеціальні заходи для підтримання стінок траншеї та продовження строку їх стійкості. Рекомендується комбінувати кілька підходів: підвищення швидкості безперервного бетонування, застосування тимчасового укріплення стінок та модифікація параметрів глинистої суспензії. Зокрема, збільшення густини бурового розчину суттєво поліпшує стійкість траншеї та зменшує потрібну вагу конструкції для занурення: підвищення густини суспензії з приблизно $1,03 \text{ т/м}^3$ до $1,5 \text{ т/м}^3$ знижує ефективну масу бетонної секції від 25 % до 37 %

за рахунок виштовхувальної сили. Така зміна підвищує безпеку виконання робіт, оскільки зменшує навантаження на опускні канати і сповільнює осідання ґрунту. Отже, для успішного впровадження гравітаційного видавлювання на великих глибинах обов'язковим є інженерний супровід, що забезпечує довготривалу стійкість траншеї — від оптимізації темпів бетонування до використання підсилених глинистих розчинів та тимчасових кріплень.

Окремо слід підкреслити перспективність інтеграції технології гравітаційного видавлювання в метод будівництва «зверху вниз» (top-down). У схемі «top-down» спочатку з поверхні влаштовуються підземні несучі стіни, які слугують постійними огорожувальними конструкціями котловану, після чого споруджуються перекриття верхнього ярусу і поступово проводиться виїмка ґрунту під їх захистом. Технологія гравітаційного видавлювання добре узгоджується з таким підходом, оскільки дозволяє виконати монолітну підземну стіну з поверхні ще до розгортання повного циклу земляних робіт. Секція армобетонної конструкції, виготовлена методом гравітаційного видавлювання, може виконувати роль діафрагмової стіни, виконаної монолітно на всю глибину проєкту. Це означає, що одразу після опускання стінки на розрахункову глибину вона сприймає навантаження ґрунту і води, забезпечуючи стійкість котловану, і може використовуватися як частина постійної конструкції. Далі будівництво за методом «top-down» продовжується: зводяться верхні перекриття, які додатково забезпечують просторову жорсткість стін, і поступово виконуються роботи вниз до фундаментної плити. Інтеграція гравітаційного видавлювання в технологію «top-down» має значний потенціал, адже поєднує швидке формування підземної огорожувальної конструкції з мінімальними земляними роботами на початковому етапі та високою якістю отриманої стінки. Монолітна опущена стіна може слугувати як надійна частина постійної споруди, скорочуючи загальну тривалість будівництва та підвищуючи ефективність спорудження глибоких підземних об'єктів.

Висновки до четвертого розділу

1. Було сформовано цілісну методику проєктування технології гравітаційного видавлювання, яка систематизує інженерні, організаційні та технологічні рішення для всіх етапів — від риття траншеї до демонтажу обладнання. Методика є базовою для складання робочого регламенту та технічних допусків. Визначено перелік вихідних умов, що обов'язково аналізуються перед проєктуванням: геометрія конструкції, гео- та гідрогеологія, просторові обмеження майданчика, експлуатаційні вимоги та наявні ресурси. Їх комплексний облік забезпечує адаптацію технології під конкретний об'єкт. Крім того, у розділі було описано поетапний технологічний цикл (траншея — монтаж модуль-форми — первинне бетонування — безперервне бетонування з опусканням — фіксація та демонтаж). Для кожного етапу наведені ключові операції, контрольні точки та вимоги до оснащення.

2. Подано рекомендації щодо раціональних геометричних параметрів секцій: товщина від 0,4 м до 0,6 м, довжина від 6 м до 18 м (з потенціалом на зведення довших безшовних елементів), глибина одного проходу від 20 м до 25 м. Обґрунтовано межі доцільної глибини: без додаткового кріплення траншея залишається стабільною близько 48 годин, що зазвичай відповідає глибині до 25 м. При >25 м необхідно підвищувати швидкість бетонування, застосовувати посилений буровий розчин або тимчасові кріплення. Наголошено на перевагах інтеграції з технологією «top-down», оскільки опущена монолітна стіна одразу виконує функцію огородження котловану й стає частиною постійної конструкції, скорочуючи строки й підвищуючи надійність підземних споруд.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Актуальність дослідження обумовлена зростанням масштабів підземного будівництва в сучасних умовах урбанізації та обмеженості міських просторів, що вимагає впровадження нових технологій зведення армобетонних конструкцій, які забезпечують високу швидкість робіт, мінімізацію вартості й гарантовану якість безперервного монолітного формування. Традиційна технологія «стіна в ґрунті» за глибини понад меж від 15 м до 20 м виявляє значні трудові та фінансові витрати, потребує дорогих методів укріплення й не завжди дозволяє досягти бажаної герметичності конструкції. У зв'язку з цим розробка та обґрунтування методу гравітаційного видавлювання стає особливо важливою для підвищення ефективності й безпеки підземного зведення.

2. Вперше в межах дослідження обґрунтовано застосування методу гравітаційного видавлювання для зведення підземних армобетонних стін, що дає змогу забезпечити контроль якості монолітних конструкцій безпосередньо на етапі виготовлення до опускання в траншею, а також зменшити кількість стиків порівняно зі збірними системами.

- Визначено ключові геометричні розміри стін (товщину, довжину та глибину), монтажну вагу та часові інтервали набору розпалубної міцності, початку тужавіння і досягнення максимальної міцності бетону. На їхній основі сформульовано залежності продуктивності та трудомісткості процесу від зазначених параметрів.
- Розроблено технічне завдання для проєктування модуль-форми опалубної системи, що забезпечує необхідну жорсткість, герметичність і зручність монтажу та демонтажу.
- Застосовано комплекс підходів: описовий, порівняльний (зіставлення з технологією «стіна в ґрунті»), метод експертної оцінки, експериментальне й організаційно-технологічне моделювання, формалізацію, системно-структурний та статистичний аналіз, а також інструменти теорії множин та теорії ймовірності. Це дало змогу всебічно вивчити фактори, що впливають

на ефективність технології, та закласти основу для подальших досліджень у сфері будівельних процесів.

3. Проведено математичне моделювання та аналітичне дослідження продуктивності й трудомісткості процесу гравітаційного видавлювання залежно від факторів: геометричних розмірів конструкції, часу набору розпалубної міцності, початку тужавіння та досягнення максимальної міцності бетону.

- Встановлено, що чинні норми праці й часу не враховують особливостей безперервного видавлювання, тому для оцінки трудомісткості застосовано метод цілочислового нормування, що передбачає розподіл технологічного процесу на окремі операції та дії.
- Визначено, що технологія є економічно та технічно доцільною при зануренні модульної опалубки на діапазон від 15 м до 25 м за умови використання бетону класу не нижче C25/30 і температури зовнішнього повітря від +10 °C до +25 °C. Поза цим інтервалом (глибше 25 м) доцільно використовувати швидкотверднучі добавки для збереження продуктивності та якості процесу.
- Встановлено, що інтенсивність подачі бетонної суміші має знаходитись у межах від 12 м³/год до 20 м³/год із швидкістю опускання від 5 см/год до 25 см/год, що забезпечує безперервність роботи й запобігає локальним перервам процесу (зумовленим організаційними паузами від 10 % до 20 %).
- Модель прогнозує час бетонування першого ярусу від 4 до 10 годин, що забезпечує необхідний час для досягнення бетоном потрібної міцності для початку видавлювання конструкції без ризику його зчеплення з матеріалом палуби.
- Прийнято середній граничний інтервал 48 годин для збереження стійкості стінок траншеї, що лягло в основу моделі сукупного обмеження ефективності процесу.

4. Практична цінність роботи полягає у створенні готового технічного завдання для проєктування модуль-форми опалубки, що забезпечує однорідність бетонування та зручність монтажу та демонтажу на будівельному майданчику.

- Надано чітку послідовність виконання технологічних процесів, граничні параметри продуктивності та трудомісткості, а також вимоги до складу бетонної суміші й глинистої суспензії для стабілізації траншеї.
- Впровадження методу дозволяє здійснювати безпосередній візуальний та інструментальний контроль якості бетону до опускання стінової конструкції, що суттєво знижує витрати на виправлення дефектів в експлуатації.
- Зниження собівартості від 5 % до 10 % порівняно з технологією «стіна в ґрунті» при глибинах понад 15 м обумовлює доцільність широкого впровадження гравітаційного видавлювання в проєктах підземного будівництва.
- Рекомендується дослідити вплив складу глинистої суспензії на монтажну вагу системи, удосконалити логістику подачі матеріалів і розробити адаптивні алгоритми регулювання швидкості опускання залежно від реальних умов на об'єкті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Галинский А. М. Влияние технологических факторов на процесс устройства горизонтального противифльтрационного экрана в грунте // Нові технології в будівництві. – 2016. – № 31. – С. 14–21.
2. Лисиков Б. А., Кауфман Л. Л. Подземная структура городов : обзор зарубежного строительства ; монографія. – Донецьк : Норд-Пресс, 2004. – 276 с.
3. Конюхов Д. С. Использование подземного пространства : учебное пособие. – М. : Архитектура, 2004. – 295 с. : ил.
4. Келемен Я., Вайда Е. Город под землей : монографія. – М. : Стройиздат, 1985. – 248 с.
5. Голубев Г. Е. Подземная урбанистика : градостроительные особенности развития систем подземных сооружений : монографія. – М. : Стройиздат, 1979. – 231 с. : ил.
6. Руководство по проектированию свайных фундаментов / НИИОСП им. Н. М. Герсегонова. – М. : Стройиздат, 1980. – 151 с.
7. Руководство по выбору проектных решений фундаментов / НИИОСП им. Н. М. Герсегонова. – М. : Стройиздат, 1984. – 207 с.
8. ASME Shale Shaker Committee. Drilling Fluids Processing Handbook. – Houston : Gulf Professional Publishing, 2004. – 696 с. – ISBN 0-7506-7775-9.
9. Свайные фундаменты : СНиП 2.02.03-85. – М. : Госстрой СССР, 1985.
10. Настанова з проектування підпірних стін : ДСТУ-Н Б В.2.1-31:2014. – К. : Мінрегіон України, 2015.
11. ДБН В.1.1-3-97 «Інженерний захист територій, будинків і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення» / Держбуд України. – К. : Держбуд України, 1998. – 40 с.

12.Никитенко М. И. Буроинъекционные анкеры и сваи при строительстве и реконструкции зданий и сооружений : монографія / М. И. Никитенко. – Минск : БНТУ, 2007. – 580 с.

13.Ободовский А. А. Некоторые вопросы дальнейшего повышения несущей способности свай / А. А. Ободовский // Строительство и архитектура. – 1965. – № 7.

14.Організація будівництва : підручник / С. А. Ушацький (ред.) ; С. А. Ушацький, Ю. П. Шейко, Г. М. Тригер та ін. – К. : Кондор, 2007. – 521 с. – ISBN 978-966-351-079-8.

15.Turček P., Sulovská M. Using the observation method for foundations of high-rise buildings / P. Turček, M. Sulovská // Geotechnical Engineering in Urban Environments. – 2007. – Т. 1. – С. 160–169.

16.Tomlinson M. J., Woodward J. P. Pile Design and Construction Practice : monograph / M. J. Tomlinson, J. P. Woodward. – London : CRC Press, 2008. – 448 p.

17.Метелюк Н. С. Сваи и свайные фундаменты : справочное пособие / Н. С. Метелюк и др. – Київ : Будівельник, 1977. – 256 с.

18.Winterkorn H. F., Fang H. Y. Foundation Engineering Handbook : монографія / H. F. Winterkorn, H. Y. Fang (ред.) – New York : Van Nostrand Reinhold, 1991. – 968 p.

19.Сівко В. Й., Голенков Г. М., Макогон С. А., Сівко Є. В., Грищенко Є. В. Особливості взаємодії робочого органу з ґрунтом при вібраційному зануренні будівельних елементів / V. Y. Sivko et al. // Техніка будівництва : наук.-техн. журн. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – 2006. – Вип. 19. – С. 15–19.

20.Ганичев И. А. Устройство искусственных оснований и фундаментов : монографія. – М. : Стройиздат, 1981. – 543 с.

21.Пособие по производству работ при устройстве оснований и фундаментов (к СНиП 3.02.01-83) / НИИОСП им. Н. М. Герсегонова. – М. : Стройиздат, 1986. – 567 с.

22. Терновий В. І., Уманець І. М., Басараб В. А., Махиня О. М. Технології інженерного захисту територій від небезпечних геологічних чинників : навчальний посібник. – К. : КНУБА, 2023. – 124 с.
23. Далматов Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты : монографія / Б. И. Далматов. – Л. : Стройиздат, 1988. – 415 с.
24. Зоценко М. Л. та ін. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти : підручник. – Полтава : ПНТУ, 2004. – 568 с.
25. Крутов В. И. Основания и фундаменты на просадочных грунтах : монографія / В. И. Крутов. – К. : Будівельник, 1982. – 224 с.
26. Снісаренко В. І., Гембарський Л. В., Гембарська М. О. Технології геотехнічного будівництва : монографія / НДІ підземспецбуд. – К. : НДІ Підземспецбуд, 2015. – 551 с.
27. Инструкция по технологии и механизации строительства противофильтрационных диафрагм и монолитных несущих стен методом «стена в грунте» : РСН 316-79. – К. : НИИСП, 1980. – 103 с.
28. Галинский А. М. Совершенствование технологии строительства грунто-пленочных противофильтрационных завес : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.08 / КИСИ. – К. : КИСИ, 1990. – 24 с.
29. Технология и механизация строительства противофильтрационных завес и монолитных несущих стен способом «стена в грунте» : РСН 316-88. – К. : Госстрой УССР, 1989. – 50 с.
30. Инструкция по технологии строительства заглубленных сооружений способом «сборная стена в грунте» : РСН 000-82 / Госкомитет УССР по делам строительства. – К. : Госкомитет УССР по делам строительства, 1983. – 104 с.
31. Абызов А. Г., Зазулинский А. А., Писанко Н. В. та ін. Возведение сооружений методом «стена в грунте» : монографія / під ред. А. Л. Филахтова. – К. : Будівельник, 1976. – 204 с.

32. Филахтов А. Л., Лукьяненко Г. К., Писанко Н. В., Янчук М. Г. Опыт возведения сооружений методом «стена в грунте» : монографія. – К. : Будівельник, 1981. – 236 с. : ил.

33. Bachy Soletanche Singapore [Електронний ресурс] : сайт компанії. – Режим доступу: <https://bachy-soletanche.com.sg/> (дата звернення: 12.02.2023).

34. Qin S., Cheng Y., Zhou W.-H. State-of-the-art review on pressure infiltration behavior of bentonite slurry into saturated sand for TBM tunneling // Smart Construction and Sustainable Cities. – 2023. – Т. 1. – Арт. 14. – DOI: 10.1007/s44268-023-00018-y.

35. Wang J. H., Xu Z. H., Di G. E., Wang W. D. Performance of a deep excavation constructed using the united method : bottom-up method in the main building part and top-down method in the annex building part [Тези доповідей] // Proceedings of GeoShanghai International Conference. – Шанхай, 2006. – DOI: 10.1061/40867(199)48.

36. Endicott J. Digging deeper and smarter [Електронний ресурс] / Aecom. – 2018. – Режим доступу: <https://aecom.com/without-limits/article/digging-deeper-smarter/> (дата звернення: 12.02.2023).

37. Zargar S. H., Mirmohammadi S. M. Top-down construction method: a case study of commercial building in Tehran [Електронний ресурс] / S. H. Zargar, S. M. Mirmohammadi. – ResearchGate, 2018. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/330313785_Top-Down_Construction_Method_A_Case_Study_of_Commercial_Building_in_Tehran (дата звернення: 19.08.2023).

38. Xu R.-Q. Performance of a large-scale excavation by bottom-up technique in Hangzhou soft clay // Advances in Civil Engineering. – 2021. – Article ID 6061849, 14 p. – DOI: 10.1155/2021/6061849.

39. Tan J. G. A comparison of performance of deep excavation using the top-down and bottom-up methods in Kenny Hill Formation // Measurement : Journal of the International Measurement Confederation. – 2014. – Т. 47, № 1. – С. 645–650. – DOI: 10.1016/j.measurement.2013.09.030.

40. Fang G. Case study of top-down construction method in upper-soft and lower-hard stratum // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Т. 1044–1045. – С. 561–568. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1044-1045.561.

41. Махиня О. М., Галенко Є. О. Палі-колони при зведенні будівель методом «вгору–вниз» (top-down) : стаття // *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин : збірник наукових праць*. – 2023. – № 51 (1). – С. 78–92. – DOI: 10.32347/2707-501x.2023.51(1).259-270.

42. Huang M. A new subway station construction method: top-down boring with cast-in-situ arch : стаття // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Т. 501–504. – С. 1706–1712. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.501-504.1706.

43. Ng C. C., Liu Z. Y., Agus R. Underpinning for TBM to under-cross a building in Thomson–East Coast Line (TEL) Contract T220 [Електронний ресурс] / C. C. Ng, Z. Y. Liu, R. Agus. – Singapore : ONE SMART Engineering Pte Ltd; Land Transport Authority; AECOM, 2023. – Режим доступу: <https://www.scribd.com/document/517125464> (дата звернення: 23.04.2023)

44. Nethaniel. Thomson line construction [Електронний ресурс] / Nethaniel. – Blogspot, 2014, травень. – Режим доступу: <https://thomson-line.blogspot.com/2014/05/construction-methodologies.html> (дата звернення: 16.06.2025)

45. Технологія будівельного виробництва : монографія / за ред. О. О. Літвінової, Ю. І. Белякової. – К. : Вища школа, 1984. – 479 с..

46. Tuan B. Q. Semi top-down method combined with earth-bank, an effective method for basement construction : стаття // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – Т. 143, № 1. – Арт. 012047. – DOI: 10.1088/1755-1315/143/1/012047

47. Lubach A. J. Bentonite cavities in diaphragm walls: case studies, process decomposition, scenario analysis and laboratory experiments : дисертація

magistra / Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences. – Delft, 2010. – 113 c.

48.Чернухин А. М. Исследование влияния свойств глинистых суспензий на технологию строительства подземных стенок и противофильтрационных диафрагм : дис. канд. техн. наук : 05.23.08 / Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – К., 1975.

49.Kim D., Jeong S., Jung G., Park J. Load-sharing ratio of prebored and precast pile in top-down method construction process : стаття // Structural Design of Tall and Special Buildings. – 2018. – Т. 27, № 10. – Art. e1472. – DOI: 10.1002/tal.1472

50.Дауров М. К., Тонкачєєв Г. М. Влаштування прямокутних паль методом занурення з виготовленням на форшахті : стаття // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. 65. – С. 153–157.

51.Formwork and falsework for heavy construction : guide to good practice // The International Federation for Structural Concrete (fib). – Bulletin No. 48, January 2009. – DOI: 10.35789/fib.BULL.0048

52.Тонкачєєв Г. М. Обґрунтування технологічних параметрів підйомних опалубок під час зведення каркасів багатоповерхових будівель : стаття // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах ринкових відносин : збірник наукових праць. – 2014. – Т. 1. – Вип. 31. – С. 25–30.

53.Тонкачєєв Г. М., Шарапа С. П., Клис М. В. Технологія зведення монолітних багатоповерхових будівель і перспективи її розвитку : стаття // Містобудування та територіальне планування : збірник наукових праць. – К. : КНУБА, 2010. – Вип. 47. – С. 633–637.

54.Peurifoy R. L., Oberlender G. D. Formwork for Concrete Structures : monograph. – New York : McGraw-Hill, 2011. – 543 p.

55.Diaconu R., Paul D. Optimum solution for sliding formwork equipment : стаття // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Т. 808. – С. 298–306. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.808.298.

56. Li W., Lin X., Bao D. W., Xie Y. M. A review of formwork systems for modern concrete construction : стаття // Structures. – 2022. – Т. 38. – С. 52–63. – DOI: 10.1016/j.istruc.2022.01.089/

57. Галенко Є. О., Махиня О. М. Класифікація ковзних опалубних систем : стаття // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин : збірник наукових праць. – 2023. – № 52 (1). – С. 157–170. – DOI: 10.32347/2707-501x.2023.52(1)

58. Технология строительства заглубленных сооружений способом «сборная стена в грунте» : РСН 272–90. – К. : Госстрой України, 1991. – 80 с.

59. Бахрушин В. Є. Методи аналізу даних : навчальний посібник для студентів. – Запоріжжя : Класичний приватний університет, 2011. – 268 с.

60. Грабовецький Б. Є. Методи експертних оцінок: теорія, методологія, напрямки використання : монографія / Грабовецький Б. Є. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 171 с.

61. Величко О. М. та ін. Групове експертне оцінювання та компетентність експертів : монографія / за заг. ред. Величко О. М. – Одеса : ФОП Бондаренко М. О., 2015. – 286 с.

62. Жученко А. І., Ладієва Л. Р., Піргач М. С., Жураковський Я. Ю. Математичне моделювання процесів і систем : навчальний посібник / Жученко А. І. та ін. – К. : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2021. – 351 с.

63. Гнатієнко Г. М., Снитюк В. Є. Експертні технології прийняття рішень : монографія / Гнатієнко Г. М., Снитюк В. Є. – К. : Маклаут, 2008. – 444 с.

64. Галенко Є. О., Махиня О. М. Дослідження факторів впливу на технологію зведення підземних конструкцій методом гравітаційного видавлювання : стаття // Таврійський науковий вісник. Серія «Технічні науки». – 2025. – Вип. 1. – С. 540–550. – DOI: 10.32782/tnv-tech.2025.1.

65. Тетюр А. Н., Логинов В. Ф. Проектирование и строительство подземных зданий и сооружений : монографія / Тетюр А. Н., Логинов В. Ф. – К. : Будівельник, 1990. – 168 с. : ил. – ISBN 5-7705-0319-X.

66.Li Y. Analysis on the causes and prevention measures of the potential safety hazard of the formwork support system : стаття // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Т. 510, № 5. – Арт. 052021. – DOI: 10.1088/1755-1315/510/5/052021.

67.Iffland J. S. B. Practical Design of Concrete Diaphragm Walls : доповідь // Transportation Research Record. – 1978. – № 684 : Tunneling and Underground Structures. – С. 37–43.

68.Косенков Е. Д. Строительство высотных сооружений в скользящей опалубке : монографія. – К. : Будівельник, 1971. – 144 с.

69.Пшінько О. М., Радкевич А. В., Нетеса М. І., Нетеса А. М. Технологія спеціальних робіт : навчальний посібник. – Дніпро : Журфонд, 2020. – 432 с. – ISBN 978-966-934-259-1.

70.Настанова щодо проектування і улаштування заглиблених споруд способом «стіна в ґрунті» : ДСТУ-Н Б В.2.1-29:2014. – К. : Мінрегіон України, 2014. – 80 с.

71.Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу : ДСТУ Б В.2.7-215:2009. – Введ. 2010-01-01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 32 с.

72.Будівельні матеріали. Суміші бетонні та бетон. Загальні технічні умови : ДСТУ Б В.2.7-176:2008. – Введ. 2010-04-01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2008. – 45 с.

73.Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Никитинський А. В., Романенко О. В. Оцінювання гранулометричного складу вторинних заповнювачів, отриманих із відходів бетону : стаття // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2023. – Вип. 206. – С. 121–127.

74.Київський національний університет будівництва і архітектури. Товарознавство заповнювачів для бетонів і розчинів : навчальний посібник. – К. : КНУБА, 2021. – 111 с.

75.Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Технічні умови : ДСТУ Б В.2.7-96:2000 (ГОСТ 7473-94). – Введ. 2001-01-01. – К. : Держбуд України, 2000. – 20 с.

76.Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань : ДСТУ Б В.2.7-114:2002 (ГОСТ 10181-2000). – Введ. 2003-01-01. – К. : Держбуд України, 2002. – 40 с.

77.Лабораторія Ковальської. Час набору міцності бетону марки В30 при різних температурах : інформаційний лист. – К. : Лабораторія Ковальської, 29 квітня 2025. – (неопубліковано).

78.Опалубка для зведення монолітних бетонних і залізобетонних конструкцій. Класифікація і загальні технічні вимоги : ДСТУ Б В.2.8-41:2011. – Введ. 2012-12-01. – К. : Мінрегіон України, 2011. – 20 с.

79.Belabid A., Akhzouz H., Elminor H. та ін. Monolithic Structure Technology: a new construction process to enhance traditional construction : стаття // International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology. – 2023. – Т. 14, № 1. – С. 42–47. – DOI: 10.30880/ijscet.2023.14.01.005.

80.Steel panel formwork ORMA : технічна специфікація [Електронний ресурс] / ULMA Construction. – Режим доступу: <https://www.ulmaconstruction.com/en/formwork/wall-formwork-column-formwork/panel-formwork-orma> (дата звернення: 02.02.2024).

81.Concrete Forming Accessories Handbook : посібник [Електронний ресурс] / Dayton Superior. – Режим доступу: <https://www.daytonsuperior.com/docs/default-source/handbooks/concreteformingaccessorieshb.pdf> (дата звернення: 02.02.2024).

82.Лелик Я. Р., Берлач О. П. Розрахунок геометричних параметрів при проектуванні опалубки для просторових криволінійних поверхонь : стаття // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2010. – Т. 6, № 4. – С. 223–228.

83.Тонкачєєв Г. Н., Шарапа С. П., Клис М. В. Аналіз опалубних систем, що використовуються при зведенні багатоповерхових будівель : стаття // Містобудування та територіальне планування. – 2019. – Вип. 65. – С. 635– 636.

84. Lancashire H. T. A simulated comparison between profile and areal surface parameters: Ra as an estimate of Sa : електронний препринт [Електронний ресурс] / H. T. Lancashire. – 2017. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/1708.02284> (дата звернення: 25.07.2023).

85. Ra Roughness – Arithmetic Average of Roughness Profile : довідкова стаття [Електронний ресурс] / Plastiform. – Режим доступу: <https://www.plastiform.info/en/blog/metrology/roughness-ra-arithmetic-average-of-roughness-profile/> (дата звернення: 25.07.2023).

86. Caterpillar Inc. 349 Hydraulic Excavator : технічна специфікація [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20190802-8e08d-5977e> (дата звернення: 09.12.2022).

87. Liebherr-France SAS R 940 Demolition Litronic : технічна специфікація [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.liebherr.com/en-us/p/644140-4342673> (дата звернення: 09.12.2022).

88. BAUER Maschinen GmbH BG 22 H (BT 65) – Rotary Drilling Rig : технічна специфікація [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cdn.cranemarket.com/specifications/bauer-drilling-rigs-spec-9b64f4.pdf> (дата звернення: 09.12.2022).

89. Soilmec S.p.A. SM-14 : технічна специфікація [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.soilmec.com/en/products/microdrilling/sm14> (дата звернення: 09.12.2022).

90. Устройство противofiltrационных стенок в траншеях под глинистым раствором : обзор отечественного и зарубежного опыта / під ред. А. Л. Филахтова. – К. : НИИСП Госстроя УССР, 1968. – 119 с.

91. Рекомендации по регулированию параметров глинистой корки при строительстве противofiltrационных завес способом «стена в грунте» : методические указания. – М. : НИИОиПС им. Н. М. Герсеева, Госстрой СССР, 1984. – 19 с.

92.Махиня О. М., Терновий В. І. Застосування гідравлічного імпульсного змішувача для приготування прохідницьких глинистих розчинів в способі «стіна в ґрунті» : стаття // Нові технології в будівництві. – 2005. – № 1(9). – С. 62–65.

93.Махиня О. М., Галенко Є. О. Теоретичні дослідження монтажної ваги армовидавлювальних конструкцій : стаття // Основи та фундаменти / Bases and Foundations. – 2024. – № 49. – С. 77–85. – DOI: 10.32347/0475-1132.49.2024.77-85.

94.Поліщук В. М. Деталі машин і підйомно-транспортне обладнання : навчальний посібник. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 118 с.

95.Лабораторна робота № 5 : вивчення і вибір вантажопідіймальних механізмів для монтажу обладнання : методичні вказівки / Кафедра ОПХВ ім. проф. Ф. Ю. Ялпачика. – Мелітополь : ТДАТУ, 2019. – 12 с.

96.Ярощук О. М. Системи експертного оцінювання : навчальний посібник. – К. : КПІ, 2015. – 120 с.

97.Куц Ю. В., Лисенко Ю. Ю. Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами : навчальний посібник. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 100 с.

98.Ручківський В. В. Методи розрахунку інженерних захисних конструкцій при спорудженні підземних об'єктів у межах щільної забудови : дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Ручківський В. В. – К. : Київ. нац. ун-т будівництва і архітектури, 2023. – 180 с.

99.Кафедра геотехніки та фундаментобудування. Механіка ґрунтів і основи фундаментобудування : конспект лекцій. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 100 с.

100. Тонкачєєв Г. М., Кушнар'єв М. В. Вплив конструктивних рішень підйомних опалубок на трудомісткість та тривалість опалубних робіт : стаття // Будівельне виробництво : міжвід. наук.-техн. зб. – 2019. – Вип. 68. – С. 25–30.

101. Тонкачєєв Г. М., Тонкачєєв В. Г. Визначення тривалості процесу монтажу та демонтажу опалубки за методом цілочисленного нормування : стаття // Будівельне виробництво : міжвід. наук.-техн. зб. – 2019. – Вип. 67. – С. 31–36.
102. ЕНiР. Сборник Е4. Монтаж сборных и устройство монолитных железобетонных конструкций. Выпуск 1. Здания и промышленные сооружения : збірник норм і расцінок / Госстрой СССР. – М. : Стройиздат, 1987. – 64 с.
103. Matejević-Nikolić B. D., Zlatanović M. Concreting process productivity analysis : стаття // Facta Universitatis. Series “Architecture and Civil Engineering”. – Niš : University of Niš, Faculty of Civil Engineering and Architecture, 2018. – Т. 16, № 1. – С. 159–173. – DOI: 10.2298/FUACE170710013M
104. HUANG F., JI H., WANG Z., PAN Q., LING T. Stability of slurry trench walls considering coupling effects of soil heterogeneity and pore water pressure : стаття // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. – 2024. – Т. 46, № 3. – С. 539–548. – DOI: 10.11779/CJGE20221401
105. Güvel Ş. T. Forecasting slipform labor productivity in the construction of reinforced concrete chimneys : стаття // Ain Shams Engineering Journal. – 2025. – Т. 16, № 1. – С. 103192. – DOI: 10.1016/j.asej.2024.103192
106. Zayed T., Sharifi M. R., Baciuc S., Amer M. Slip-form application to concrete structures // Journal of Construction Engineering and Management. – 2008. – Vol. 134, № 3. – С. 157–168. – DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:3(157)
107. Nash K. L. Diaphragm wall construction techniques : стаття // Journal of the Construction Division. – 1974. – Т. 100, № 4. – С. 605–620. – DOI: 10.1061/JCCEAZ.0000462
108. Bilgen G., Afşar E. Diaphragm Wall Construction Cost by the Well Method on Cohesive and Non-Cohesive Soils : стаття // Turkish Journal of Nature Sciences / Zonguldak Bülent Ecevit University. – Zonguldak : Zonguldak

Bülent Ecevit University, 2021. – Vol. 10, № 2. – С. 283–289. – DOI: 10.46810/tdfd.1015264

109. Jule L., Zhuye H., Cedric M. Structural Installation of Precast Concrete Elements : стаття // Journal of Engineering and Architecture. – 2020. – Т. 8, № 2. – С. 1–12. – DOI: 10.15640/jea.v8n2a1