

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.