

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця на  
правах рукопису

ЯКІВЧУК СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК:666.97.033.11:620.92:621.311.243 (043.3)

**ДИСЕРТАЦІЯ**

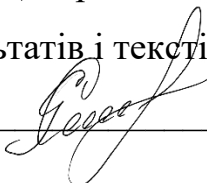
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕРМОСИЛОВОЇ  
ТЕХНОЛОГІЇ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ  
СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

132 Матеріалознавство

13 Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

  
Сергій ЯКІВЧУК

Науковий керівник:  
ШВЕЦЬ Людмила Василівна  
кандидат технічних наук, доцент

Вінниця – 2026

## АНОТАЦІЯ

*Яківчук С.В.* Підвищення енергетичної ефективності термосилової технології високоміцних бетонів з використанням сонячної енергії – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття освітньо–наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – Матеріалознавство. – Вінницький національний аграрний університет, Вінниця, 2026.

У дисертаційній роботі отримано нові наукові результати, які полягають у розробленні та вдосконаленні термосилових технологій обробки високоміцних бетонів із використанням енергоефективних систем теплопостачання та альтернативних джерел енергії. У роботі запропоновано нові моделі термосилових установок, що включають геліоколектори, теплоакumuлюючі системи та комбіновані теплові комплекси, які забезпечують раціональне використання теплової енергії під час процесу тверднення бетонів. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено ефективність використання сонячної енергії у термосилових технологіях виробництва високоміцних бетонів нового покоління.

Вдосконалено режими прогріву бетонних виробів із використанням відновлюваних джерел енергії, що дозволяє знизити енерговитрати та собівартість продукції без погіршення її фізико–механічних характеристик.

Встановлено, що застосування м'яких режимів прогріву за допомогою сонячної енергії сприяє зменшенню внутрішніх температурних напружень, забезпечує рівномірніше формування структури цементного каменю та покращує довговічність бетонних виробів. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено концепцію синергетичної взаємодії надлишкового тиску та нестационарного температурного поля, сформованого геліосистемою, що позитивно впливає на процеси структуроутворення бетонів. Розроблено моделі виготовлення бетонних виробів із використанням термосилових впливів на процеси формування структури бетону, що дозволило обґрунтувати ефективні режими ущільнення та теплової обробки

бетонів в умовах діючих підприємств. Також розроблено конструктивні рішення термосилових установок із використанням геліоколекторів, які характеризуються покращеними техніко–економічними показниками, зменшеними тепловтратами та вищою енергоефективністю порівняно з відомими аналогами. Отримані результати дозволяють сформулювати новий підхід до енергоощадного виробництва бетонних виробів із використанням відновлюваних джерел енергії та сучасних теплоізоляційних систем.

Зміст дисертаційного дослідження викладений у чотирьох розділах, у яких послідовно розглянуто теоретичні, експериментальні та практичні аспекти вдосконалення термосилової технології бетонів. Робота присвячена дослідженню та вдосконаленню термосилової технології обробки високоміцних бетонів нового покоління із застосуванням енергоефективних теплових систем, ізольованих термос–камер та альтернативних джерел енергії.

Актуальність роботи обумовлена високими енерговитратами традиційних способів тепловологісної обробки бетонних виробів, необхідністю зниження собівартості будівельної продукції та потребою підвищення швидкості набору ранньої міцності бетонів. Особливої актуальності дослідження набуває в умовах сучасної енергетичної нестабільності, дефіциту енергоресурсів та необхідності переходу до енергоощадних технологій виробництва будівельних матеріалів.

Об’єкт дослідження – технологія отримання бетонів із використанням комплексу фізичних впливів, спрямованих на отримання бетонів із високими фізико–механічними та економічними характеристиками.

Предмет дослідження – параметри та закономірності термосилової обробки високоміцних бетонів з використанням сонячної енергії та їхній вплив на фізико-механічні характеристики виробів.

Метою дисертаційної роботи є підвищення енергоефективності термосилової технології бетонів шляхом оптимізації температурних режимів, параметрів тиску та використання альтернативних джерел теплової енергії. Для досягнення поставленої мети було сформовано комплекс наукових

завдань, пов'язаних із розробленням математичних моделей тепломасообміну, дослідженням процесів теплопереносу, визначенням оптимальних режимів теплової обробки та експериментальною перевіркою ефективності запропонованих технічних рішень. Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження запропонованої технології на підприємствах будівельної індустрії з метою зниження енерговитрат, підвищення якості бетонних виробів та скорочення тривалості виробничого циклу.

У першому розділі проведено детальний аналіз сучасних методів теплової та термосилової обробки бетонів, досліджено технологічні особливості виготовлення бетонних виробів та визначено основні фактори, які впливають на процес набору міцності бетонів. Розглянуто традиційні методи пропарювання, електропрогріву, тепловологісної обробки, термосного методу та комбінованих систем прогріву. Встановлено, що традиційні пропарочні камери характеризуються значними енергетичними витратами, які становлять до 180–220 кВт·год на 1 м<sup>3</sup> бетонної продукції, а також нерівномірністю температурного режиму, значними тепловтратами та тривалою тривалістю виробничого циклу. Проаналізовано наукові дослідження вітчизняних та зарубіжних учених у сфері енергозбереження та теплової обробки бетонів. Значну увагу приділено вивченню процесів теплообміну, гідратації цементу та формування внутрішньої структури бетону під дією температури та тиску.

У розділі також розглянуто вплив температури, надлишкового тиску, вібрації та хімічних добавок на фізико–механічні властивості бетонів, зокрема на їхню міцність, морозостійкість, водонепроникність та довговічність.

Проведено аналіз сучасних підходів до підвищення енергоефективності технологій тверднення бетонів та визначено перспективні напрями використання альтернативних джерел енергії у виробництві будівельних матеріалів. Доведено перспективність застосування сонячних теплових колекторів для забезпечення енергоефективної теплової обробки бетонних виробів. Визначено, що використання сонячної енергії у поєднанні з термосиловою технологією дозволяє скоротити тепловтрати, забезпечити

стабільність температурного режиму тверднення бетону та знизити енергетичне навантаження на виробничі системи. Окрему увагу приділено аналізу фізико–хімічних процесів гідратації цементу, впливу температурного поля на процес структуроутворення цементного каменю та формуванню мікроструктури бетонів нового покоління. Встановлено, що оптимізація теплових режимів дозволяє забезпечити прискорення набору ранньої міцності бетонів без виникнення критичних внутрішніх напружень та структурних дефектів.

У другому розділі розроблено методику моделювання процесів термосилової обробки високоміцних бетонів та обґрунтовано конструктивні особливості пакетної термосилової установки нового покоління. Проведено аналіз тепломасообмінних процесів, що відбуваються під час тверднення бетонів у термосилових установках, та розроблено математичну модель, яка враховує вплив температури, тиску, тривалості прогріву, теплових потоків та умов теплообміну на процес набору міцності бетонів.

Чисельне моделювання виконувалося у програмних середовищах COMSOL Multiphysics, що дозволило визначити оптимальні температурні режими, розподіл температурних полів та рівень тепловтрат у різних типах установок. У роботі обґрунтовано склад високоміцного бетону класу B50–B55 зі співвідношенням компонентів цемент : пісок : щебінь = 1 : 1,24 : 2,2 за водоцементного відношення 0,33. Проведено планування багатофакторного експерименту, визначено рівні варіювання факторів та побудовано регресійні залежності для прогнозування ранньої та кінцевої міцності бетонів. Встановлено оптимальні параметри термосилової обробки: температура 68–70 °С, тиск 0,25–0,30 МПа та тривалість прогріву 5,5–6 годин.

Отримані результати дозволили сформуванню науково обґрунтованих рекомендацій щодо оптимізації режимів теплової обробки бетонів із використанням енергоефективних теплових систем. У розділі також виконано моделювання теплових потоків у термосилових установках різного типу та проведено аналіз температурних режимів у процесі прогріву бетонних

виробів. Визначено закономірності зміни температурного поля залежно від конструктивних параметрів установки, типу теплоізоляції та інтенсивності тепlopостачання. Проведено оцінку впливу теплоакумулюючих систем на стабільність температурного режиму та доведено ефективність використання комбінованих геліосистем для забезпечення рівномірного прогріву бетонів.

Окрему увагу приділено розробленню конструкції термосилової установки без використання вібраційних пружин, оснащеної вдосконаленими термоблоками та динамометричною системою контролю тиску, що дозволяє підвищити точність регулювання технологічного процесу та зменшити енергоспоживання установки.

У третьому розділі наведено результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень процесів термосилової обробки бетонів нового покоління. Проведено дослідження температурних полів, теплових потоків та кінетики набору міцності бетонів у різних типах термосилових установок: із застосуванням сонячної енергії, комбінованої геліосистеми, енергетичного комплексу та ізольованої термос-камери. Побудовано поверхні відгуку та двомірні перерізи залежності міцності бетонів від температури, тиску та тривалості прогріву.

Встановлено закономірності зміни температурних режимів у процесі тверднення бетонів та визначено вплив параметрів прогріву на фізико-механічні характеристики бетонів. Визначено, що використання термосилової технології забезпечує досягнення ранньої міцності 43–45 МПа через 24 години та кінцевої міцності 62–65 МПа через 28 діб тверднення. Доведено, що використання ізольованого режиму «термосу» дозволяє знизити тепловтрати на 25–40 %, забезпечити більш рівномірний розподіл температури в бетонному виробі та зменшити внутрішні температурні напруження. Окрему увагу приділено дослідженню впливу температури на вологість бетонних виробів, швидкість гідратації цементу та процес формування структури цементного каменю.

Встановлено, що оптимальні температурні режими забезпечують

підвищення щільності бетону, зменшення капілярної пористості та покращення довговічності бетонних виробів. У розділі також проведено порівняльний аналіз ефективності різних типів термосилових установок та визначено, що найбільш енергоефективною є система з комбінованою геліосистемою та теплоакумулятором.

Встановлено, що використання сонячної енергії дозволяє скоротити витрати традиційних енергоносіїв на 25–40 % залежно від режиму роботи установки та кліматичних умов експлуатації. Проведено аналіз кінетики охолодження бетонних виробів після завершення теплової обробки та встановлено, що використання ізольованих термос–камер забезпечує плавне зниження температури без різких теплових деформацій, що позитивно впливає на довговічність бетонів.

Отримані результати підтверджують ефективність використання термосилової технології для виробництва високоміцних бетонів транспортного та дорожнього призначення.

У четвертому розділі виконано техніко–економічне обґрунтування результатів дослідження та розглянуто практичне застосування розробленої термосилової технології у виробництві бетонних виробів транспортного призначення. Проведено порівняльний аналіз традиційної теплової обробки та запропонованої енергоефективної термосилової установки. Встановлено, що енерговитрати при використанні традиційних технологій становлять 180–220 кВт·год/м<sup>3</sup>, тоді як для розробленої установки вони знижуються до 85–110 кВт·год/м<sup>3</sup>. Розрахунки підтвердили, що економія електроенергії становить близько 1025 грн на 1 м<sup>3</sup> бетонних виробів, а річний економічний ефект від експлуатації установки становить приблизно 717 500 грн.

Практичне впровадження результатів роботи підтверджено під час виготовлення першого бетонного прототипу – «Кассельського бордюру», для якого були використані оптимізовані режими термосилової обробки та високоміцний бетон нового покоління. Доведено, що використання термосилової технології дозволяє скоротити тривалість виробничого циклу,

знизити витрати енергії, підвищити якість бетонних виробів та зменшити негативний вплив виробництва на навколишнє середовище.

У розділі також проведено оцінку економічної ефективності використання сонячних теплових колекторів та комбінованих систем тепlopостачання. Визначено строки окупності запропонованих технічних рішень та встановлено їхню доцільність для використання на підприємствах будівельної індустрії. Розглянуто можливість масштабування технології для серійного виробництва бетонних виробів та визначено перспективи її впровадження у виробництво дорожніх елементів, тротуарної плитки, бордюрів та інших будівельних конструкцій.

Отримані результати підтверджують перспективність використання енергоефективних термосилових технологій у сучасному виробництві бетонних та бетонних виробів, а також їхню важливу роль у розвитку енергоощадних технологій будівельної галузі України.

**Ключові слова:** бетон, міцність, енергоефективність, легкий бетон, будівельні відходи, ресурсозберігаюча технологія, стінові матеріали, щільність, пошкодження, реконструкція, інфраструктура, фундамент, основа, будівельні конструкції, термосилова технологія.

## ANNOTATION

*Yakivchuk S.* Improving the Energy Efficiency of Thermo-Force Technology for High-Strength Concrete Using Solar Energy – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 132 – Materials Science. – Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, 2026.

The dissertation presents new scientific results related to the development and improvement of thermo-force technologies for the treatment of high-strength concrete using energy-efficient heat supply systems and alternative energy sources. The work proposes new models of thermo-force installations that include solar collectors, heat storage systems, and combined thermal complexes, which ensure the rational use of thermal energy during the concrete hardening process. The efficiency of using solar energy in thermo-force technologies for the production of new-generation high-strength concrete has been theoretically substantiated and experimentally confirmed.

The heating regimes for concrete products using renewable energy sources have been improved, which makes it possible to reduce energy consumption and production cost without deteriorating their physical and mechanical properties.

It has been established that the use of mild heating regimes with solar energy helps reduce internal thermal stresses, ensures more uniform formation of the cement stone structure, and improves the durability of concrete products. The concept of synergistic interaction between overpressure and a non-stationary temperature field formed by a solar system has been theoretically substantiated and experimentally confirmed; this interaction positively affects the structure formation processes in concrete. Models for manufacturing concrete products using thermo-force effects on concrete structure formation processes have been developed, making it possible to justify effective compaction and heat treatment regimes for concrete under the conditions of operating enterprises. In addition, design solutions for thermo-force installations using solar collectors have been developed. These installations are characterized by improved technical and economic indicators, reduced heat losses,

and higher energy efficiency compared with known analogues. The obtained results make it possible to form a new approach to the energy-saving production of concrete products using renewable energy sources and modern thermal insulation systems.

The dissertation research is presented in four chapters, which consistently examine the theoretical, experimental, and practical aspects of improving the thermo-force technology of concrete. The work is devoted to the study and improvement of the thermo-force treatment technology for new-generation high-strength concrete using energy-efficient thermal systems, insulated thermos chambers, and alternative energy sources.

The relevance of the work is determined by the high energy consumption of traditional methods of heat-and-moisture treatment of concrete products, the need to reduce the cost of construction products, and the need to increase the rate of early strength gain in concrete. The study becomes especially relevant under conditions of modern energy instability, shortage of energy resources, and the need to transition to energy-saving technologies in the production of construction materials.

The object of the study is the technology of obtaining concrete using a complex of physical effects aimed at producing concrete with high physical, mechanical, and economic characteristics.

The subject of the study is the parameters and regularities of thermo-force treatment of high-strength concrete using solar energy and their influence on the physical and mechanical characteristics of products.

The aim of the dissertation is to improve the energy efficiency of thermo-force concrete technology by optimizing temperature regimes, pressure parameters, and the use of alternative sources of thermal energy. To achieve this aim, a set of scientific tasks was formulated, related to the development of mathematical models of heat and mass transfer, the study of heat transfer processes, the determination of optimal heat treatment regimes, and the experimental verification of the effectiveness of the proposed technical solutions. The practical significance of the work lies in the possibility of implementing the proposed technology at construction industry enterprises in order to reduce energy consumption, improve the quality of

concrete products, and shorten the production cycle.

The first chapter provides a detailed analysis of modern methods of thermal and thermo-force treatment of concrete, examines the technological features of manufacturing concrete products, and identifies the main factors influencing the process of concrete strength gain. Traditional methods of steam curing, electric heating, heat-and-moisture treatment, the thermos method, and combined heating systems are considered. It has been established that traditional steam-curing chambers are characterized by significant energy consumption, amounting to 180–220 kWh per 1 m<sup>3</sup> of concrete products, as well as uneven temperature distribution, considerable heat losses, and a long production cycle. Scientific studies by domestic and foreign researchers in the field of energy saving and heat treatment of concrete have been analyzed. Considerable attention is given to the study of heat transfer processes, cement hydration, and the formation of the internal structure of concrete under the influence of temperature and pressure.

The chapter also examines the influence of temperature, overpressure, vibration, and chemical admixtures on the physical and mechanical properties of concrete, particularly its strength, frost resistance, water resistance, and durability.

Modern approaches to improving the energy efficiency of concrete hardening technologies have been analyzed, and promising directions for using alternative energy sources in the production of construction materials have been identified. The prospects of using solar thermal collectors to ensure energy-efficient heat treatment of concrete products have been proven. It has been determined that the use of solar energy in combination with thermo-force technology makes it possible to reduce heat losses, ensure stability of the concrete hardening temperature regime, and decrease the energy load on production systems. Special attention is paid to the analysis of the physicochemical processes of cement hydration, the influence of the temperature field on cement stone structure formation, and the formation of the microstructure of new-generation concrete. It has been established that optimization of thermal regimes ensures accelerated early strength gain in concrete without the occurrence of critical internal stresses and structural defects.

The second chapter develops a methodology for modeling the processes of thermo-force treatment of high-strength concrete and substantiates the design features of a new-generation batch-type thermo-force installation. The heat and mass transfer processes occurring during concrete hardening in thermo-force installations are analyzed, and a mathematical model is developed that takes into account the influence of temperature, pressure, heating duration, heat flows, and heat exchange conditions on the process of concrete strength gain.

Numerical modeling was performed in the COMSOL Multiphysics software environment, which made it possible to determine optimal temperature regimes, the distribution of temperature fields, and the level of heat losses in different types of installations. The composition of high-strength concrete of class B50–B55 was substantiated, with the component ratio cement : sand : crushed stone = 1 : 1.24 : 2.2 and a water–cement ratio of 0.33. A multifactorial experiment was planned, factor variation levels were determined, and regression dependencies were constructed to predict the early and final strength of concrete. The optimal parameters of thermo-force treatment were established: temperature of 68–70 °C, pressure of 0.25–0.30 MPa, and heating duration of 5.5–6 hours.

The obtained results made it possible to formulate scientifically substantiated recommendations for optimizing concrete heat treatment regimes using energy-efficient thermal systems. The chapter also presents modeling of heat flows in different types of thermo-force installations and analyzes temperature regimes during the heating of concrete products. Regularities in the change of the temperature field depending on the design parameters of the installation, type of thermal insulation, and intensity of heat supply were determined. The influence of heat storage systems on the stability of the temperature regime was assessed, and the efficiency of using combined solar systems to ensure uniform heating of concrete was proven.

Special attention is given to the development of a thermo-force installation design without the use of vibration springs, equipped with improved thermoblocks and a dynamometric pressure control system. This makes it possible to improve the

accuracy of technological process regulation and reduce the energy consumption of the installation.

The third chapter presents the results of numerical modeling and experimental studies of thermo-force treatment processes for new-generation concrete. Temperature fields, heat flows, and the kinetics of concrete strength gain were studied in different types of thermo-force installations: with the use of solar energy, a combined solar system, an energy complex, and an insulated thermos chamber. Response surfaces and two-dimensional sections of the dependence of concrete strength on temperature, pressure, and heating duration were constructed.

Regularities in the change of temperature regimes during concrete hardening were established, and the influence of heating parameters on the physical and mechanical characteristics of concrete was determined. It was found that the use of thermo-force technology ensures early strength of 43–45 MPa after 24 hours and final strength of 62–65 MPa after 28 days of hardening. It was proven that the use of an insulated “thermos” regime reduces heat losses by 25–40%, ensures a more uniform temperature distribution in the concrete product, and decreases internal thermal stresses. Special attention is paid to the study of the influence of temperature on the moisture content of concrete products, the rate of cement hydration, and the process of cement stone structure formation.

It has been established that optimal temperature regimes increase concrete density, reduce capillary porosity, and improve the durability of concrete products. The chapter also provides a comparative analysis of the efficiency of different types of thermo-force installations and determines that the most energy-efficient system is the one with a combined solar system and a heat accumulator.

It has been established that the use of solar energy reduces the consumption of conventional energy carriers by 25–40%, depending on the operating mode of the installation and climatic operating conditions. The cooling kinetics of concrete products after completion of heat treatment were analyzed, and it was found that the use of insulated thermos chambers ensures a gradual decrease in temperature without sharp thermal deformations, which has a positive effect on concrete durability.

The obtained results confirm the effectiveness of using thermo-force technology for the production of high-strength concrete intended for transport and road applications.

The fourth chapter presents the technical and economic substantiation of the research results and considers the practical application of the developed thermo-force technology in the production of concrete products for transport purposes. A comparative analysis of traditional heat treatment and the proposed energy-efficient thermo-force installation was conducted. It was established that energy consumption when using traditional technologies amounts to 180–220 kWh/m<sup>3</sup>, whereas for the developed installation it decreases to 85–110 kWh/m<sup>3</sup>. The calculations confirmed that electricity savings amount to approximately UAH 1,025 per 1 m<sup>3</sup> of concrete products, while the annual economic effect from the operation of the installation is approximately UAH 717,500.

The practical implementation of the research results was confirmed during the manufacture of the first concrete prototype — a Kassel kerb — for which optimized thermo-force treatment regimes and new-generation high-strength concrete were used. It was proven that the use of thermo-force technology makes it possible to shorten the production cycle, reduce energy consumption, improve the quality of concrete products, and decrease the negative environmental impact of production.

The chapter also assesses the economic efficiency of using solar thermal collectors and combined heat supply systems. The payback periods of the proposed technical solutions were determined, and their feasibility for use at construction industry enterprises was established. The possibility of scaling the technology for serial production of concrete products was considered, and the prospects for its implementation in the production of road elements, paving slabs, kerbs, and other construction structures were determined.

The obtained results confirm the prospects of using energy-efficient thermo-force technologies in the modern production of concrete and concrete products, as well as their important role in the development of energy-saving technologies in the construction industry of Ukraine.

**Keywords:** concrete, strength, energy efficiency, lightweight concrete, construction waste, resource-saving technology, wall materials, density, damage, reconstruction, infrastructure, foundation, subgrade, building structures, thermo-force technology.

**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ  
ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ**

**Статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б», включених  
до міжнародних наукометричних баз даних**

1. Дудар І. Н., Друкований М. Ф., Гарнага В. Л., Яківчук С. В. Використання сонячної енергії для термосилової обробки бетону методом термосу. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2016. Т. 20, № 1. С. 27–30. URL: <https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/443> (0,28 друк. арк., особистий внесок здобувача: досліджено можливість використання сонячної енергії для термосилової обробки бетону методом термосу, проаналізовано теплові режими тверднення бетонів та оцінено вплив геліосистем на енергоефективність процесу теплової обробки бетонних виробів – 0,20 друк. арк.).
2. Дудар І. Н., Гарнага В. Л., Яківчук С. В. ТВО бетонних виробів із використанням сонячної енергії і тиску. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2017. Т. 22, № 1. С. 11–16. URL: <https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/494> (0,38 друк. арк., особистий внесок здобувача: проведено дослідження процесів тепловологісної обробки бетонних виробів із використанням сонячної енергії та тиску, визначено вплив термосилового режиму на процес тверднення і набір ранньої міцності бетонів, а також проаналізовано енергоефективність застосування геліосистем у технології теплової обробки бетонних виробів – 0,12 друк. арк.).
3. Швець Л. В., Яківчук С. В. Термосилова технологія бетонів нового покоління. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 4(119). С. 96–101. DOI: 10.37128/2520–6168–2022–4–12. URL: <http://tetapk.vsau.org/storage/articles/January2023/6zY0RZRC8ABwXCJdMEkf.pdf> (0,51 друк. арк., особистий внесок здобувача: досліджено вплив термосилової обробки на фізико–механічні властивості високоміцних

бетонів, проаналізовано енергоефективні способи підвищення міцності бетону із застосуванням місцевих матеріалів, а також обґрунтовано комплексний вплив температури, тиску та технологічних факторів на процес тверднення бетонів нового покоління – 0,26 друк. арк.).

4. Швець Л. В., Яківчук С. В. Оцінка максимальної температури, досягнутої під час твердіння бетону. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 4(111). С. 88–93. DOI: 10.37128/2306–8744–2023–4–12. URL: <http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/35816.pdf> (0,51 друк. арк., особистий внесок здобувача: проаналізовано енергоефективні технології теплової обробки бетонів, досліджено вплив температурних режимів, тиску та додаткових технологічних факторів на властивості бетону, а також обґрунтовано доцільність використання альтернативних джерел енергії для зниження енергетичних витрат і підвищення ефективності виробництва бетонних виробів – 0,26 друк. арк.).

5. Яківчук С. В. Дослідження теплових та масообмінних процесів під час твердіння бетонів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Т. 361, № 1. С. 490–495. DOI: 10.31891/2307–5732–2026–361–68. URL: <https://doi.org/10.31891/2307–5732–2026–361–68> (0,60 друк. арк.).

### **Матеріали конференцій**

6. Яківчук С. В. Оцінка температур при термосилової обробці високоміцних бетонів. *Recent Trends in Science: матеріали II Міжнародної науково–практичної інтернет–конференції*, 04–05 травня 2023 р. Дніпро, 2022. С. 311–312 (0,10 друк. арк.).

7. Яківчук С. В. Термосилова технологія бетонів. *Future of Work: Technological, Generational and Social Shifts: матеріали II Міжнародної науково–практичної інтернет–конференції*, 11–12 травня 2023 р., м. Дніпро. С. 199–200 (0,10 друк. арк.).

8. Яківчук С. В. Сучасні інноваційні методи сталого виробництва бетонів нового покоління з використанням термосилової технології.

*Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування: матеріали X Міжнародної науково–практичної конференції, 27–30 травня 2025 р., м. Луцьк. С. 184–186 (0,21 друк. арк.).*

### **Патенти та авторські свідоцтва**

9. Дудар І. Н., Гарнага В. Л., Яківчук С. В. Пакетна термосилова установка: пат. 97265 Україна: МПК В30В 11/02. № u201408738; заявл. 01.08.2014; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 5.

10. Дудар І. Н., Гарнага В. Л., Яківчук С. В. Пакетна термосилова установка з комбінованою геліотехнологією: пат. 106340 Україна: МПК В30В 11/00. № u201509799; заявл. 09.10.2015; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8.

11. Гарнага В. Л., Яківчук С. В. Пакетна термосилова установка з енергетичним комплексом: пат. 107582 Україна: МПК В30В 11/00. № u201600068; заявл. 04.01.2016; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 11.

12. Гарнага В. Л., Яківчук С. В. Пакетна термосилова установка із термосом: пат. 123922 Україна: МПК В30В 11/00. № u201710087; заявл. 18.10.2017; опубл. 12.03.2018, Бюл. № 5.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	21
ВСТУП .....	22
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ І ВИЯВЛЕННЯ ПРОБЛЕМИ В ТЕРМОСИЛОВІЙ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ БЕТОНІВ .....</b>	<b>31</b>
1.1 Аналіз існуючих технологій, що використовуються при тепловій обробці .....	31
1.2 Дослідження існуючого обладнання для термообробки бетонних виробів.....	37
1.3 Використання сонячної енергії при обробці бетону .....	43
1.4 Структура виробництва високоміцних бетонів .....	49
1.5 Методика підготовки виробництва високоміцних бетонів .....	59
1.6 Висновки до розділу 1 .....	62
<b>РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОСИЛОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПІДБІР СКЛАДУ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ .....</b>	<b>65</b>
2.1. Методологічні засади експериментальних досліджень .....	65
2.2 Обґрунтування пакетної термосилової установки .....	66
2.3 Вплив сонячної енергії на обробку високоміцних бетонів при моделювання термосилової технології.....	69
2.4 Опис характеристик використаних матеріалів .....	73
2.5 Планування багатофакторного експерименту та параметрична оптимізація показників міцності бетону .....	76
2.6 Висновки до розділу 2 .....	84
<b>РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРМОСИЛОВОЇ ОБРОБКИ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ .....</b>	<b>86</b>
3.1 Моделювання термосилової обробки високоміцних бетонів.....	86
3.2 Пакетна термосилова установка з застосуванням сонячної енергії .....	89
3.3 Пакетна термосилова установка з комбінованою геліосистемою .....	92
3.4 Пакетна термосилова установка з енергетичним комплексом.....	94
3.5 Пакетна термосилова установка з термосом.....	97
3.6 Аналіз результатів моделювання .....	100
3.7 Висновки до розділу 3 .....	106

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНІ РІШЕННЯ ТЕРМОСИЛОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	109
4.1 Практичне використання високоміцного бетону з використанням сонячної енергії .....	109
4.2 Дослідження властивостей бетонних зразків виготовлених у термосиловій установці з режимом термос.....	116
4.3 Економічне обґрунтування термосилової технології з застосуванням сонячної енергії при виготовлені Кассельського бордюру .....	128
4.4 Висновок до розділу 4: .....	133
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	136
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	139
ДОДАТКИ.....	156

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

**A<sub>sol</sub>** – площа сонячного колектора, м<sup>2</sup>

**A<sub>tb-b</sub>** – площа контакту між термоформою та бетоном, м<sup>2</sup>

**БВ** – бетонний виріб

**БС** – бетонна суміш

**В/Ц** – водоцементне відношення

**V<sub>п</sub>** – об'єм пор

**G(t)** – інтенсивність сонячного випромінювання у момент часу t, Вт/м<sup>2</sup>

**dT/dt** – швидкість зміни температури у часі, °С/год

**E** – модуль пружності бетону, МПа

**K** – коефіцієнт підсилення міцності під тиском

**КПД** – коефіцієнт корисної дії

**c<sub>p</sub>** – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·°С)

**m** – маса, кг

**p** – щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>

**Q** – кількість теплоти, Дж

**Q<sub>hyd(t)</sub>** – теплота гідратації цементу у момент часу t, Дж

**Q<sub>loss</sub>** – тепловтрати системи, Дж

**Q<sub>sol</sub>** – теплова енергія від сонячного випромінювання, Дж

**ТСО** – термосилова обробка

**ТСВ** – термосилова технологія

**T** – температура, °С

**T<sub>tb</sub>** – температура термоформи, °С

**Ц** – кількість цементу у бетонній суміші, кг

**Щ** – кількість щебеню, кг

## ВСТУП

Бетон у сучасному будівництві займає провідне місце серед конструкційних матеріалів завдяки поєднанню високих фізико-механічних характеристик, технологічності та довговічності. Його широко застосовують під час зведення житлових, громадських, промислових та інженерних об'єктів, а також у транспортному будівництві. Значна роль бетону обумовлена можливістю формування конструкцій складної геометричної конфігурації, забезпечення високої несучої здатності та експлуатаційної надійності споруд. Особливого значення бетон набуває у монолітному будівництві, де визначальними є не лише міцнісні показники матеріалу, а й його технологічні властивості, що забезпечують архітектурну виразність та конструктивну ефективність будівель і споруд. Сучасний розвиток будівельної галузі характеризується активним зростанням обсягів висотного та інфраструктурного будівництва, що потребує застосування високоміцних бетонів з покращеними експлуатаційними характеристиками та підвищеною енергоефективністю технології їх виготовлення.

У будівельній галузі спостерігається стійка тенденція до збільшення обсягів виробництва монолітного бетону з підвищеними фізико-механічними характеристиками. Така тенденція обумовлена необхідністю забезпечення високих темпів будівництва, скорочення тривалості технологічних циклів, підвищення експлуатаційної надійності будівельних конструкцій та ефективності використання матеріальних і енергетичних ресурсів. Особливої актуальності набуває проблема забезпечення необхідних показників міцності бетону у ранні терміни тверднення, що є однією з ключових задач сучасної технології бетонування та виробництва бетонних і залізобетонних виробів. Вирішення зазначеної задачі пов'язане з удосконаленням методів теплової та термосилової обробки бетонів, спрямованих на інтенсифікацію процесів гідrataції цементу, формування щільної структури цементного каменю та підвищення енергоефективності технологічних процесів.

Одним із найважливіших методів інтенсифікації твердіння бетону є теплова обробка, яка дозволяє прискорити процеси гідратації цементу та формування структури цементного каменю. Відомо, що вплив оптимізованих температурно–вологісних режимів може значно покращити такі характеристики бетону, як рання та нормативна міцність, морозостійкість, водонепроникність і загальна довговічність. До цього часу у виробничих умовах застосовувалися різні способи теплової обробки: пропарювання, електропрогрів, інфрачервоне нагрівання та інші методи, кожен з яких мають свої переваги та обмеження.

Під час виготовлення будівельних виробів теплова обробка є одним із найбільш енерговитратних технологічних процесів в будівельній галузі, на який припадає близько 60 % загальних енерговитрат всього виробництва. Теоретично для нагрівання бетонного виробу та металевих форм необхідно лише 10–15 % теплової енергії, тоді як решта витрат, характерних для традиційних технологій, припадає на непродуктивні теплові втрати, що можуть дорівнювати майже 50 % від загального обсягу енергоспоживання.

Сучасний технічний стан обладнання підприємств, що спеціалізуються на виробництві бетонних виробів, потребує подальшої реконструкції та модернізації. Це зумовлено необхідністю розширення асортименту різної продукції, підвищення її якості та зниження собівартості в умовах сучасного конкурентного ринку. У зв'язку з цим одним із визначальних критеріїв вибору нових технологій мають бути як їх енергетична ефективність, так і наявність ефективної системи керування всіма технологічними процесами.

**Актуальність теми.** Сучасний етап розвитку будівельної галузі характеризується домінуванням бетону як основного конструкційного матеріалу для зведення об'єктів цивільного, промислового та спеціального призначення. Завдяки високим експлуатаційним характеристикам та технологічній гнучкості, бетон є незамінним у транспортному будівництві та реалізації складних архітектурних проєктів. Особливого значення набуває монолітне будівництво, де застосування високоміцних бетонів (ВМБ)

забезпечує не лише надійність висотних споруд, а й дозволяє оптимізувати матеріаломісткість конструкцій за рахунок високої питомої міцності матеріалу.

Тенденції останнього десятиліття в Україні та світі вказують на стале зростання попиту на бетонні суміші з покращеними фізико–механічними властивостями. Ключовим викликом для сучасної технології бетону є скорочення термінів обороту опалубки та інтенсифікація темпів зведення об'єктів без втрати якості структуроутворення. У цьому контексті критично важливим є забезпечення прискореного набору розпалубної та проектної міцності бетону в ранні терміни тверднення.

Традиційним методом вирішення цієї задачі є теплова обробка (ТВО), яка активізує кінетику гідратації цементного каменю та сприяє швидкому формуванню міцнісного каркаса. Проте класичні методи інтенсифікації тверднення – такі як пропарювання в камерах, електропрогрів або інфрачервоне опромінення – характеризуються високою енергомісткістю, значними втратами теплоти та суттєвим екологічним навантаженням. В умовах глобальної енергетичної кризи та стратегії декарбонізації економіки, подальше використання енерговитратних технологій стає економічно недоцільним.

Особливої актуальності набуває розробка та впровадження енергоефективних термосилових технологій, що базуються на використанні відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної. Геліотермообробка високоміцних бетонів відкриває значні перспективи для зниження собівартості будівництва шляхом заміщення традиційних енергоносіїв. Водночас специфіка ВМБ (низьке водоцементне відношення, високий вміст модифікаторів та активних мінеральних добавок) потребує розробки специфічних режимів термосилового впливу, які враховують особливості екзотермії та кінетики структуроутворення таких систем під дією сонячної енергії. Таким чином, наукове обґрунтування та розробка технологічних параметрів підвищення енергетичної ефективності термосилової обробки із

застосуванням геліосистем є вкрай актуальною науково–прикладною задачею для сучасної будівельної галузі.

Глобальна енергетична стратегія сучасності базується на фундаментальному переході від використання викопних паливних ресурсів до інтеграції низьковуглецевих та відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Динамічний розвиток геліо– та вітроенергетики, впровадження інтелектуальних систем енергоменеджменту («smart grids») та концепції «зеленого» будівництва (Net Zero Buildings) формують нову архітектуру світової економіки. За оцінками Світової енергетичної ради (WEC), обсяги введення нових генераційних потужностей у найближчу чверть століття перевищать сумарні показники всього ХХ століття, що підкреслює критичну роль енергоефективних технологій у всіх галузях промисловості, включно з капітальним будівництвом.

Будівельна індустрія, як один із найбільш енергоємних секторів світового господарства, потребує радикального перегляду традиційних технологічних циклів. У виробництві монолітного бетону ключовим резервом енергозбереження є оптимізація процесів теплової обробки. Традиційні методи інтенсифікації тверднення (пропарювання, електротермія, інфрачервоний нагрів), попри їхню ефективність у прискоренні оборотності опалубки, створюють значне навантаження на собівартість продукції через високу частку первинних енергоносіїв.

Застосування високоміцних бетонів (ВМБ) у сучасному будівництві вимагає особливого підходу до керування процесами структуроутворення. На відміну від звичайних бетонів, ВМБ характеризуються низьким водоцементним відношенням та високим вмістом модифікуючих добавок, що зумовлює їхню чутливість до температурних градієнтів. Науково доведено, що раціонально організований термосиловий вплив дозволяє не лише прискорити процеси гідратації, а й підвищити показники нормованої та ранньої міцності на 20–40 % шляхом оптимізації морфології гідратів і ущільнення мікроструктури цементного каменю.

У цьому контексті використання сонячної енергії як основного або допоміжного теплового агента в термосиловій технології є стратегічно важливим напрямом. Перехід до геліотермічної обробки дозволяє зменшити залежність будівельного майданчика від централізованих енергомереж, суттєво знизити викиди CO<sub>2</sub> та забезпечити енергетичну автономність технологічного процесу. Таким чином, розробка наукових засад підвищення енергоефективності термосилової обробки високоміцних бетонів шляхом конверсії сонячної енергії є невід’ємною складовою глобального тренду сталого розвитку та енергетичної незалежності будівельної галузі України.

Особливе місце серед методів інтенсифікації тверднення посідає термосилова технологія, яка передбачає синергетичний вплив на бетонну суміш підвищеної температури (60–80 °C) та надлишкового тиску (0,2–0,5 МПа). Такий комбінований вплив протягом 8–12 годин забезпечує глибоку модифікацію структури цементного каменю, що проявляється у:

- інтенсифікації кінетики набору міцності на стиск (зростання на 35–50 % у ранні терміни – 3–7 діб);
- суттєвому підвищенні показників довговічності, зокрема морозостійкості (на 15–25 циклів) та корозійної стійкості;
- оптимізації порової структури, що призводить до зниження водопроникності на 20–30 %;
- прискоренні оборотності технологічного обладнання та скороченні термінів досягнення проектних показників на 30–50 %.

Незважаючи на доведену ефективність термосилового методу у виробництві високоміцних бетонів, стримувальним фактором його широкого впровадження залишається значне енергоспоживання традиційних теплових агрегатів. У цьому контексті перехід до використання енергії сонячного випромінювання як первинного теплоносія є критично важливим для забезпечення енергетичної автономності та екологічної безпеки будівельного виробництва.

Системний аналіз сучасного стану технології бетону та існуючих методів геліотермообробки дозволив визначити наукову проблему, що полягає у необхідності розробки теоретичних засад та практичних методів підвищення енергоефективності термосилових процесів шляхом інтеграції сонячної енергії в технологічний цикл виробництва ВМБ.

**Мета роботи** полягає у науковому обґрунтуванні та розробленні заходів підвищення енергоефективності термосилової технології виготовлення високоміцних бетонів із використанням сонячної енергії, що забезпечує покращення фізико–механічних властивостей матеріалу при зниженні енерговитрат.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання дослідження:

- провести аналіз існуючих і перспективних термосилових технологій високоміцних бетонів;
- обґрунтувати підбір складу: в'язуче, заповнювачі, оптимальне водоцементного–відношення для виготовлення виробів з використанням геліоустановок;
- розробити установки для впровадження енергозберігаючої термосилової технології у виробництво;
- дослідити закономірності термосилового впливу на структуроутворення та фізико–механічні характеристики високоміцних бетонів при переході на альтернативні джерела енергії;
- оптимізувати параметри термосилового впливу (температура, тиск, тривалість) для досягнення екстремальних показників енергоефективності без втрати міцності та довговічності;
- провести економічну та енергетичну оцінку ефективності даних термосилових технологій високоміцних бетонів.

**Об'єкт дослідження** – технологія отримання бетонів із використанням

комплексу фізичних впливів, спрямованих на формування матеріалу з високими фізико-механічними та економічними характеристиками.

**Предмет дослідження** – параметри та закономірності термосилової обробки високоміцних бетонів з використанням сонячної енергії та їхній вплив на фізико-механічні характеристики виробів.

**Методи досліджень.** Для розв'язання поставлених завдань використано комплекс теоретичних, експериментальних і чисельних методів дослідження. Теоретичну основу роботи становили положення матеріалознавства, теплофізики, теорії тверднення цементних композитів і тепломасообміну. Експериментальні дослідження проводили із застосуванням пакетної термосилової установки, що забезпечувала керовані режими прогріву та привантаження бетонних зразків. Температурний стан виробів контролювали за результатами вимірювання температурного поля, а фізико-механічні характеристики бетону визначали на стандартних зразках із подальшою статистичною обробкою даних. Чисельне моделювання процесів термосилової обробки виконували у середовищах COMSOL Multiphysics. Для встановлення впливу температури, тиску й тривалості прогріву застосовано методи планування багатофакторного експерименту, регресійного аналізу та побудови поверхонь відгуку, що дозволило обґрунтувати раціональні режими термосилової технології з використанням сонячної енергії.

**Наукова новизна полягає у:**

1. **Вперше** теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено закономірності впливу комплексного термосилового навантаження із використанням сонячної енергії на процеси структуроутворення високоміцного бетону, які полягають в інтенсифікації гідратаційних процесів, ущільненні цементного каменю та зменшенні капілярної пористості на 12–18 %, що забезпечує підвищення ранньої та кінцевої міцності бетонів нового покоління.

2. **Отримало подальший розвиток** моделювання процесів тепломасообміну та тверднення високоміцних бетонів при термосиловій

обробці, яке, на відміну від відомих підходів, враховує одночасний вплив температури, тиску, тривалості прогріву та надходження теплової енергії від геліосистеми. Це дозволило прогнозувати температурні поля, кінетику набору міцності та ефективність різних конструктивних варіантів термосилових установок.

3. **Отримало подальший розвиток** ефективність використання сонячної енергії у термосилових технологіях виробництва високоміцних бетонів, що дозволяє забезпечити набір ранньої міцності бетонів на рівні 43–45 МПа через 24 години та досягнення кінцевої міцності 62–65 МПа через 28 діб.

4. **Удосконалено** режими прогріву високоміцних бетонів із використанням відновлюваних джерел енергії, які, на відміну від традиційних режимів тепловологісної обробки, забезпечують скорочення тривалості теплової обробки до 5,5–6 годин, зниження енерговитрат із 180–220 кВт·год/м<sup>3</sup> до 85–110 кВт·год/м<sup>3</sup> та зменшення собівартості бетонних виробів приблизно на 18–25 %;

5. **Набули подальшого розвитку** експериментально-аналітичні підходи до дослідження тепломасообмінних процесів у бетоні, які поєднують результати математичного моделювання та експериментальних досліджень температурних режимів, процесів гідратації цементу та кінетики набору міцності бетонів у межах 24 годин і 28 діб тверднення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано у Вінницькому національному аграрному університеті в межах ініціативної науково–дослідної роботи на інженерно–технологічному факультеті «Створення та застосування нових технологій пластичного формозмінення з використанням прогресивних методів дослідження механіки деформування для отримання деталей з покращеними експлуатаційними характеристиками» (№ 0122U002097, термін виконання 03.2022 р. – 03.2026 р.), тематика дисертації узгоджується із загальним науковим напрямом зазначеної роботи в частині дослідження закономірностей

формування структури матеріалів під дією керованих теплових і силових факторів, аналізу процесів зміцнення та обґрунтування технологічних режимів отримання виробів із підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Одержані результати впроваджено в практичну діяльність: КП «Агенція просторового розвитку» та ПП «Ладога 77» (акти від 4.03.2026 р.). Положення дисертаційної роботи мають практичну цінність та використовуються при викладанні дисципліни «Інноваційні технології в агроінженерії» (довідка №01.1-60-1520 від 05.12.2024 р.).

#### **Практичне значення роботи:**

- розроблено моделі виготовлення бетонних виробів з використанням термосилових впливів на процеси структуроутворення, що дає можливість обґрунтувати та впровадити ефективні методи і режими ущільнення і синтезу структури бетону в умовах діючих підприємств, а також використання геліоколекторів для енергозбереження;

- розроблено устаткування для реалізації термосилового впливу з використанням геліокорлекторів на бетон виробів, яке має експлуатаційні і техніко–економічні характеристики, що перевищують показники відомих аналогів.

**Особистий внесок здобувача.** Самостійне отримання автором комплексу теоретичних та експериментальних результатів лягло в основу положень, що виносяться на захист. Спільна робота з науковим керівником та співавторами публікацій стосувалася формулювання завдань та аналізу отриманих даних.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 12 наукових працях, представлених у додатку Д, у тому числі: 5 статей у наукових фахових виданнях України (категорії Б); 3 тези доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій, 4 патенти на корисні моделі.

**Обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків та списку використаних джерел і додатків, що включає 165 сторінок, у тому числі додатків на 9 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 116 сторінках, містить 55 рисунків, 22 таблиці. Список використаних джерел нараховує 129 найменувань на 16 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ І ВИЯВЛЕННЯ ПРОБЛЕМИ В ТЕРМОСИЛОВІЙ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ БЕТОНІВ

#### **1.1 Аналіз існуючих технологій, що використовуються при тепловій обробці**

У сучасному матеріалознавстві досліджено вплив комбінованого термосилового методу на інтенсивність тверднення бетонів у ранньому віці, коли матеріал одночасно піддається прогріванню та механічному стиску. Встановлено, що поєднання підвищеної температури та зовнішнього тиску інтенсифікує процеси гідратації цементу, сприяє зменшенню об'єму пор у структурі бетону та прискорює формування структури каменю, що відповідає результатам сучасних досліджень у галузі термообробки бетонів [1, 2].

У ході аналізу виявлено, що підвищення температури до 60–80 °С у поєднанні зі стискальним навантаженням у межах 0,2–0,4  $\sigma_p$  значно пришвидшує набір міцності зразків. Такі режими забезпечують приріст ранньої міцності на 25–40 % порівняно з традиційною термообробкою без застосування тиску [3]. Частина досліджень демонструє можливість скорочення тривалості прогрівання на 20–30 % за умови одночасного прикладання пресувального навантаження [4].

Процеси інтенсифікації чітко пояснюються прискоренням реакцій гідратації клінкерних мінералів, ущільненням структури за рахунок часткового видавлювання надлишкової води та зниженням кількості капілярних пор, що узгоджуються із сучасними фізико–хімічними моделями тверднення цементних композитів [7, 9].

Загалом використання термосилового методу як поєднання прогріву та стискання дозволяє значно підвищити ранню міцність бетону, стабілізувати структуру матеріалу та зменшити тривалість витримання бетонних виробів у відповідних формах. Метод має перспективи для застосування у зимовому

бетонуванні та технологіях заводського виготовлення елементів, де важливе швидке зняття опалубки й максимальна ефективність виробничих циклів [17,38].

Розробка основ технології спеціальних бетонів та виробів з підвищеними показниками міцності та щільності з використанням методів термосилового впливу на процеси структуроутворення [16,17].

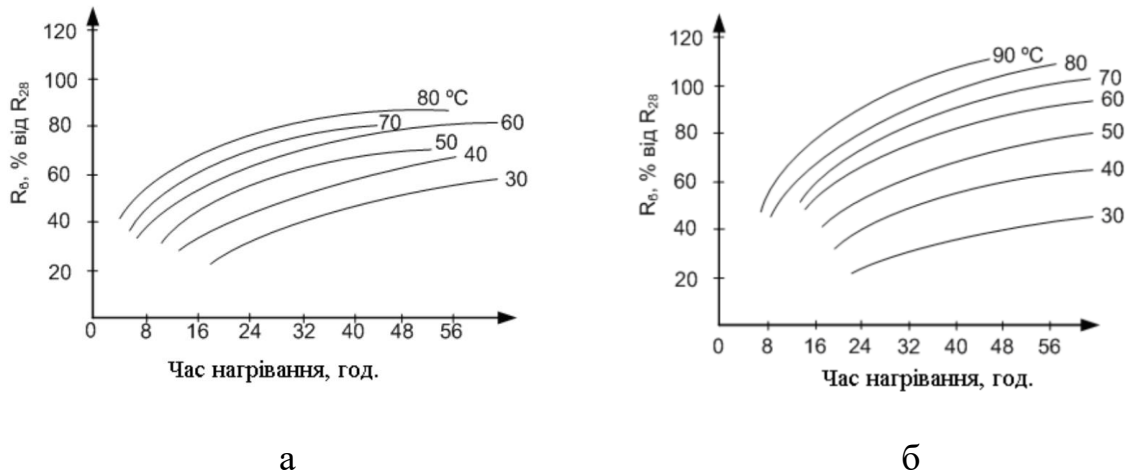


Рисунок 1.1 – Криві зростання міцності бетону при прогріванні: портландцемент (а) та шлакопортландцемент (б) [1]

В роботах одержані такі результати: розроблено технологічні основи виготовлення виробів із бетону з використанням термосилових впливів на різні процеси структуроутворення, які дають змогу обґрунтувати та впровадити ефективні методи і режими ущільнення та синтезу заданої структури бетону в умовах наявних підприємств [1,38].

В роботі [2] є вдосконалення технології виготовлення бетонних виробів з підвищеними показниками міцності, довговічності та щільності шляхом узгодженого впливу тиску, температури та повторної вібрації на процеси структуроутворення бетону, з використанням вібротермосилових установок.

В роботах [2,3,17,38], що при термосилової обробці з метою підвищення обігу форм доцільно застосовувати двостадійну теплову обробку. При цьому, первинна теплова обробка під тиском повинна проходити протягом 30–60 хв. при 100 °C, а вторинна при 80 °C протягом 4–6 год (рис. 1.2).

У роботах підтверджено, що роль вібраційного термосилового впливу (ТСВ) полягає не тільки в зниженні водоцементного відношення та зближення частинок цементу, в наслідок чого підвищується їх активність, а й у формуванні якісної структури бетону, що утворюється шляхом процесу повторного вібрування, під час якого руйнуються сольватні оболонки навколо цементних частинок, що призводить до більш повної гідратації цементу [2,3,82,113].

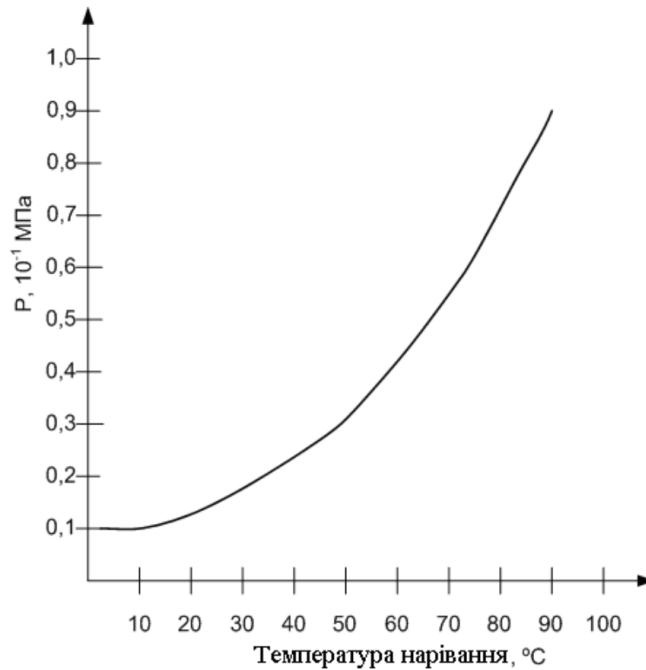


Рисунок 1.2 – Взаємозв'язок тиску Р і температури Т при термосиловому впливі [2]

В дослідженнях проведенні вдосконалення технології виготовлення бетонних виробів з підвищеними показниками міцності та іншими фізико-механічними властивостями за допомогою комплексного впливу тиску, температури та хімічних добавок [21,31,88,119].

Частина наукових досліджень присвячена створенню та дослідженню нової термосилової технології виготовлення дрібнорозмірних бетонних виробів із застосуванням хімічних добавок. Отримані в ході теоретичних і експериментальних досліджень результати підтвердили, що можливе

підвищення фізико–механічних характеристик бетону та зниження витрат відповідно в'язучих матеріалів [4,17].

У процесі дослідження встановлено, що ключовими технологічними чинниками, які визначають ефективність формування бетонних виробів, є склад бетонної суміші, величина тиску, яка використовується пор навантаженні бетонних зразків, а також температура теплової обробки. На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень визначено оптимальні склади бетонних сумішей із хімічними добавками, досліджено фізико–механічні властивості отриманого бетону та розроблено математичну модель росту міцності в умовах термосилового впливу [19, 20, 39].

Наукова новизна роботи полягає у вперше запропонованому способі термосилового впливу на бетонну суміш у спеціальних формах із використанням хімічних добавок, що дає можливість отримати бетонних виробів із покращеними фізико–механічними показниками [98,99]

Розглядаються сучасні методи прогріву бетонних виробів, включаючи інфрачервону обробку, аеродинамічне нагрівання та використання автоматизованих систем керування температурними режимами. Підкреслюється, що традиційне пропарювання бетонів характеризується значними енерговитратами, тому сучасні технології повинні бути орієнтовані на зменшення витрат теплової енергії [15,77].

У сучасних умовах виробництва бетонних виробів для інтенсифікації процесів тверднення використовують різні технологічні методи, серед яких гаряче пресування [16], пульсуюче пресування [19], віброгідропресування [42], автоклавна обробка [22], тепла обробка бетону в електромагнітних установках при надлишковому тиску [35], а також комплексна активація бетонних сумішей [14].

Зазначається, що підвищення температури прискорює початковий набір міцності бетону, однак надмірне теплове навантаження може призводити до формування неоднорідної структури, як цементного каменю, так і зниження довговічності матеріалу [8]. У термовилових технологіях обробки бетонів як

силовий фактор використовується ефект термічного розширення матеріалів в умовах сталого об'єму. Проте за таких умов у віброущільнених бетонах можуть інтенсивно розвиватися деструктивні процеси, зумовлені переважно термічним розширенням парогазової та рідкої фаз бетонної суміші [46, 47, 48].

Важливим етапом технологічного процесу виготовлення бетонних виробів є процес розпалублення, від якого значною мірою залежать якість поверхні виробу, збереження геометричних параметрів та подальший набір міцності бетону (рис.1.3).

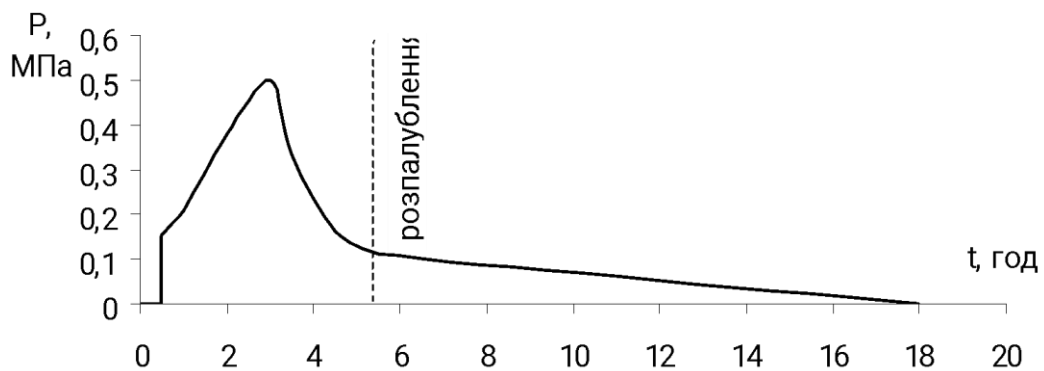


Рисунок 1.3 – Зміна тиску в бетоні в процесі ТСВ та подальшого тверднення в нормальних умовах [5]

Доослідження мікроструктури цементного каменю та вплив теплової обробки на довговічність бетонів є важливою частиною термосилової обробки. Оптимізований режим теплової обробки сприяє формуванню більш щільної структури виробів, що забезпечує підвищення водонепроникності та стійкості бетону до агресивних середовищ [9,106,112].

Зазначається, що термосиловий вплив покращує взаємодію між волокнами та цементною матрицею, що сприяє підвищенню міцності при згині та тріщиностійкості бетонних виробів [10, 108,109].

Важливим моментом є врахування процесів гідратації цементу при різних температурних режимах. Доведено, що помірне теплове тверднення сприяє формуванню однорідної структури цементного каменю, тоді як різке нагрівання може викликати структурні дефекти, які виникають локально [11].

В роботах [12–13] розроблені математичні моделі прогнозування процесів гідратації цементу при різному тепловому впливі. Цифрові моделі дозволяють визначати оптимальні режими прогріву бетонів та прогнозувати формування мікроструктури цементного каменю.

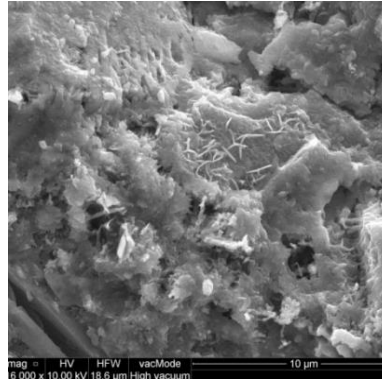


Рисунок 1.4 – Мікроструктура цементного каменю гідратованого 28 діб в нормальних умовах [12]

Отже, аналіз наукових праць свідчить про значну перспективність термосилової технології обробки бетонів. Основними напрямками сучасних досліджень є підвищення енергоефективності процесів теплової обробки, оптимізація температурних режимів, вдосконалення структури цементного каменю та використання альтернативних джерел енергії. Отримані результати створюють наукову основу для подальшого вдосконалення технологій виготовлення високоміцних та довговічних бетонних виробів, зокрема дорожніх елементів і кассельських бордюрів.

Завданням подальшої роботи над термосиловою технологією є зменшення витрат теплової енергії.

Робоча гіпотеза досліджень. Термосилова технологія бетону (ТСВ) ґрунтується на узгодженому комплексному впливі сукупності технологічних операцій стиску бетону (викликаного впливом зовнішнього тиску) та нагрівання, у результаті яких здійснюється формування структури бетону, а відповідно, і його властивостей, в умовах пластичного деформування кристалічного каркасу цементного каменю. Нагрівання є енергоємним

процесом, тому виникає потреба пошуку альтернативних способів нагріву бетону. Одним із таких методів є сонячна енергія.

Такий підхід дозволить зменшити затрати електроенергії.

Отже, подальшим завданням є зменшення затрат енергоспоживання та підвищення міцності бетону. Для цього потрібно включити використання альтернативних джерела енергії та теоретично обґрунтувати можливість отримання бетонних виробів із високоміцного бетону.

## **1.2 Дослідження існуючого обладнання для термообробки бетонних виробів**

Прискорене тверднення бетону шляхом підвищення його температури забезпечується у різних спеціальних теплових установках [2, 5], які класифікують за режимами роботи, типами технологічних ліній та конструктивною структурою (рис. 1.5). У свою чергу, процес теплової обробки бетонних виробів поділяють за способом впливу тепла, видом теплоносія та методом передачі теплової енергії.

У камерах періодичної дії вироби завантажують і розміщують у кілька ярусів. Після цього камеру герметизують і подають насичену водяну пару для забезпечення процесу теплової обробки [15, 16, 38].

Камери безперервної дії виконані у вигляді тунелю, в якому бетонні вироби у формах, розміщених на вагонетках переміщуються через зони попереднього підігріву, витримки та охолодження [96]

Стендовий спосіб передбачає формування бетонних виробів у формах на стендах, де технологічні операції виконуються із залученням окремого обладнання. Він застосовується переважно для великогабаритних конструкцій. Касетний спосіб є його різновидом і базується на виготовленні виробів у вертикальних формах із контактною тепловою обробкою. Його використовують для плоских виробів, таких як панелі.



Рисунок 1.5 – Типологія установок для прогріву бетону [4]

При поточно–агрегатному способі форми послідовно переміщуються між технологічними секціями, а при конвеєрному – рухаються на вагонетках уздовж технологічної лінії. Вібропрокатний спосіб забезпечує виконання всіх процесів на безперервній стрічковій установці, що забезпечує високу продуктивність, однак ускладнює зміну номенклатури виробів через необхідність переоснащення [17, 18].

Установки безперервної дії забезпечують високу продуктивність, скорочення тривалості теплової обробки та ефективніше використання енергоносіїв, однак є менш універсальними, складними та дорогими в експлуатації. До таких установок відноситься трансформатор прогріву бетону КТП-ОБ-80 (рис. 1.6).

Трансформатор прогріву бетону КТП-ОБ-80 широко застосовується для електротермічного прогріву бетонних конструкцій, однак така установка має ряд суттєвих недоліків технологічного, енергетичного та експлуатаційного характеру.

Одним із основних недоліків КТП-ОБ-80 є значне споживання електричної енергії під час прогріву бетонних конструкцій. У процесі роботи трансформатор забезпечує безперервне електричне навантаження, що

призводить до високих питомих енерговитрат та збільшення собівартості бетонних робіт, особливо при великих обсягах бетонування [77,100].

Суттєвою проблемою є нерівномірність прогріву бетонних виробів. У зонах, розташованих ближче до нагрівальних елементів або електродів, можуть виникати локальні перегріву, тоді як віддалені ділянки прогриваються недостатньо інтенсивно. Це призводить до формування внутрішніх температурних градієнтів, появи термічних напружень та ризику утворення мікротріщин у структурі бетону.

Недоліком електродного прогріву також є складність контролю температурного режиму. При порушенні режимів нагріву можливе пересушування поверхневих шарів бетону, що негативно впливає на процеси гідратації цементу та знижує кінцеву міцність бетонних виробів.



Рисунок 1.6 – Трансформатор прогріву бетону KTP-OB-80 [4]

У камерах періодичної дії тепла обробка здійснюється пароповітряною сумішшю, що може спричинити нерівномірний прогрів виробів. Для усунення цього недоліку застосовують системи примусової циркуляції теплоносія. Основними методами прискорення тверднення є пропарювання при атмосферному тиску та автоклавна обробка при підвищених температурі й тиску, що забезпечують інтенсивніший теплообмін і швидкий набір міцності [104,105].

Ямні пропарювальні камери (рис. 1.7) характеризуються простотою, низькою вартістю та універсальністю, однак мають низьку енергоефективність (ККД 0,1–0,15), великі тепловтрати та обмежену автоматизацію. Підвищення

ефективності досягається переходом до більш сучасних камерних систем, касетних і термоформових технологій, що дозволяє знизити енерговитрати у 1,2–1,3 рази.

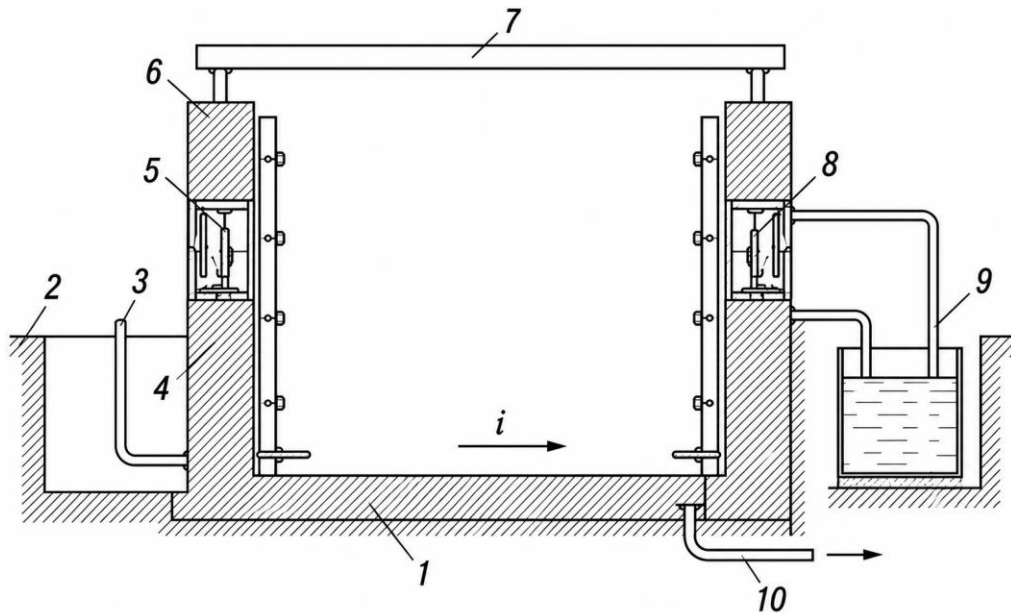


Рисунок 1.7 – Схема ямної пропарювальної камери: 1 - основа, 2 - резервуар для теплоносія, 3 - трубопровід, 4 - теплоізолювані стінки, 5 - нагрівальні елементи, 6 - вертикальні опорні елементи, 7 - верхня притискна балка, 8 - система циркуляції, 9 - бак-акумулятор, 10 - система відведення теплоносія.

Втрати тепла в теплових установках можуть сягати до 70 %. Автоклавна обробка при 175–200 °С і тиску 0,8–1,3 МПа застосовується для дрібнозернистих і пористих бетонів, сприяючи утворенню міцних цементуючих сполук та можливості використання альтернативних в'язучих матеріалів [8, 22, 103].

Водночас автоклавні системи потребують значних енергетичних витрат і складного парового господарства, частка якого сягає 26–28 % вартості підприємства, а енергетична складова собівартості перевищує 21 % [15].

Електротермообробка в автоклавах має проблему нерівномірного нагріву, що може призводити до дефектів виробів [83].

Загалом пакетні установки забезпечують високу точність дозування бетонної суміші, що дозволяє отримувати задані характеристики бетону. Це

особливо важливо для високоміцних та спеціальних бетонів, де точність відіграє важливу роль і навіть незначні відхилення у складі впливають на кінцеві властивості.

Пакетні установки мають компактні габарити порівняно з безперервними аналогічними системами безперервної дії, що робить їх зручними для розміщення на будівельних майданчиках або в умовах обмеженого простору [19, 20].

Також вони забезпечують кращий контроль вологості та температури компонентів, що є критично важливими при виробництві бетонів з термосиловою обробкою [95].

Однією з ключових проблем пакетних установок є підвищені енерговитрати на одиницю продукції.

Пакетна вібротермосилова установка [3], яка містить основу, рухома плиту, направляючі колонки, закріплені між віброплитою і верхньою плитою, прес-форму, а також пресувальне обладнання. Між основою та віброплитою встановлені пружини, а між прес-формою та віброплитою, а також між прес-формою та рухома плитою встановлені термоблоки. Як пресувальне обладнання використано шток з важелем, до якого закріплена рухома плита (рис. 1.8).

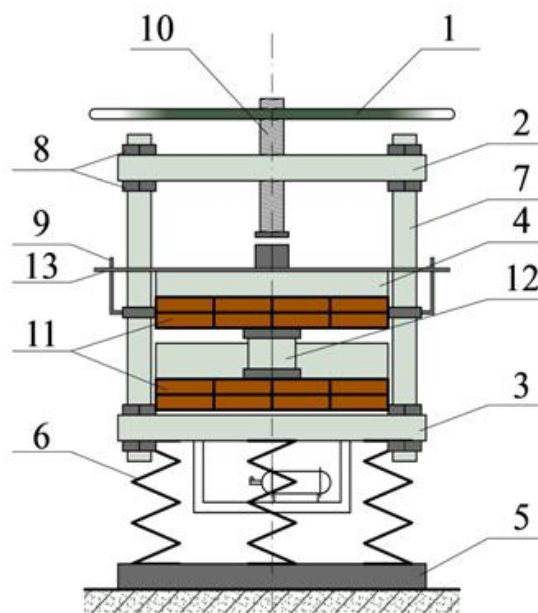


Рисунок 1.8 – Пакетна вібротермосилова установка:

1–важель; 2–верхня плита; 3–віброплита; 4–рухома плита; 5–основа;  
6–закріплені пружини; 7–направляючі колонки; 8–гайки; 9–арматура;  
10–шток; 11–термоблоки; 12–прес–форма; 13–арматура [3]

Недоліком пакетної вібротермосилової установки є великі енергозатрати, які є недоцільними.

Порівняння обладнання для прогріву бетонних виробів наведені в таблиці 1.1.

*Таблиця 1.1*

### Порівняння традиційного обладнання прогріву бетону

Показник	Ямна камера	Трансформатор КТП-ОБ-80	Вібраційна пакетна установка
Тип впливу	Тепловологісний	Електротермічний	Вібраційно-тепловий
Температура прогріву	50–90 °С	40–80 °С	40–70 °С
Тривалість прогріву	8–16 год	6–12 год	5–10 год
Джерело енергії	Електроенергія	Електроенергія	Електроенергія
Питомі енерговитрати	180–250 кВт·год/м <sup>3</sup>	220–320 кВт·год/м <sup>3</sup>	140–220 кВт·год/м <sup>3</sup>

Результати проведеного аналізу свідчать, що традиційне обладнання для теплової обробки бетонних виробів характеризується високою енергомісткістю та деструктивним градієнтним впливом на структуру матеріалу. З огляду на це, перспективним науково-практичним напрямом модернізації промислової технології є розробка та впровадження енергоефективних установок на основі геліосистем. Застосування такого обладнання дозволяє реалізувати синергетичний теплосиловий вплив на бетонну матрицю, забезпечуючи інтенсифікацію процесів

структурування за умов суттєвого зниження питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів [6, 98].

### **1.3 Використання сонячної енергії при обробці бетону**

Загальний потік випромінювання Сонця характеризується потужністю близько  $3,86 \cdot 10^{26}$  Вт із рівномірним радіальним поширенням у просторі. Частка сонячної енергії, що перехоплюється Землею, становить близько половини мільярдної частини від загальної величини, проте її абсолютне значення досягає  $1,75 \cdot 10^{17}$  Вт, що повністю перекиває поточне світове енергоспоживання. Наявність такого масштабного відновлюваного ресурсу відкриває широкі перспективи для його інтеграції у промислову технологію будівельних матеріалів. Зокрема, використання геліотермічної енергії є перспективним рішенням для оптимізації процесів прискореного структуроутворення, теплової та термосилової обробки бетонних виробів [100].

Незважаючи на відносно низьку щільність потоку сонячної радіації, що досягає на поверхні Землі, її енергетичний потенціал є значним. Загальна потужність випромінювання Сонця становить близько  $4 \cdot 10^{14}$  млрд кВт. Протягом року на Землю у вигляді променевої енергії надходить орієнтовно  $1,56 \cdot 10^{15}$  кВт, що більш ніж у 20 тис. разів перевищує сучасний рівень світового споживання паливно-енергетичних ресурсів. У перспективі сонячна енергія як енергоносіє становить практичний інтерес для залучення її в енергобаланс будівельної галузі країни [5,6].

Отже, у подальшому доцільним є застосування сонячної енергії в будівельних технологіях загалом і в термосилової технології бетону зокрема.

Практична реалізація геліотехнічних проєктів та імплементація методів залучення сонячної енергії в технологію бетонних робіт передбачають вирішення комплексу актуальних науково-практичних завдань. До них належать: теоретичне обґрунтування параметрів і розробка високоефективних

геліоустановок та систем для заводського виготовлення виробів і зведення монолітних споруд; техніко-економічне оцінювання доцільності впроваджуваних рішень; створення спеціалізованої матеріально-технічної бази для виробництва та експлуатації геліосистем теплової обробки бетону. Невід'ємною складовою цього процесу є експериментальна верифікація геліотехнічного обладнання, а також відпрацювання інноваційних технологічних та організаційних регламентів виконання бетонних робіт із використанням альтернативного теплового потенціалу. Слід зазначити, що системна інтеграція відновлюваних джерел енергії у будівельну практику становить складну багатоаспектну проблему [22,121].

Геліотехнічні пристрої – геліокамери, із замкнутою металевою оболонкою та одношаровим прозорим огороженням, розміщені в теплоізолюваному коробі з одношаровим прозорим дахом, переставна геліокамера з акумуляторами тепла, прозорим огороженням та металевою камерою [23].

Геліокамери встановлюють на місцевості з орієнтацією поздовжньої осі за напрямком схід–захід.

Прозорі огороження всіх геліотехнічних пристроїв і систем виконані з поліетиленової плівки з коефіцієнтом пропускання у видимій області спектра 0,72, інфрачервоної – 0,80 [24].

Енергетичну оцінку ефективності роботи геліоустановок і систем виконано за температурою нагріву бетонних зразків [25,35].

Бетон виготовляли на портландцементі з водоцементиним відношенням В/Ц = 0,51 та витратою цементу 415 кг/м<sup>3</sup>. Бетонну суміш із температурою 21°C укладали в текстолітові форми розміром 20x20 см з металевим дном. Бічні стінки форм теплоізолювані. Температуру нагріву теплоносія та бетону в центрі зразка, реєстрували за допомогою хромель–копелевих термопар і записували потенціометром типу КСП–4 [26, 95].

У різний час проведено декілька експериментів з метою забезпечення повторюваності їх результатів і отримання достовірних даних. Із

зпідвищенням щільності потоку сонячної радіації на поверхні бетонних виробів зростає температура їх нагрівання. Так, в одноконтурній системі зі ступенем концентрації 1,8 отримано максимальну температуру нагріву бетону до 70°C, що на 15°C перевищує температуру в бетоні при твердінні його в одноконтурній системі без відбивних екранів. Для бетонних зразків, витриманих у пристрої типу плоского колектора із застосуванням концентратора променевої енергії, зафіксована температура до 52°C, що на 10°C перевищує значення, отримані в аналогічному пристрої без концентрації сонячної радіації [27].

Дані досліджень свідчать, що з енергетичної точки зору найбільший представляють геліокамери з теплосприймаючою поверхнею, а також одноконтурні гравітаційні системи нагріву рідкого теплоносія [28,29].

Відповідно, у подальшому пропонується застосовувати геліокамери для попереднього нагріву заповнювачів перед їхнім завантаженням у бетонозмішувач (рис. 1.9)

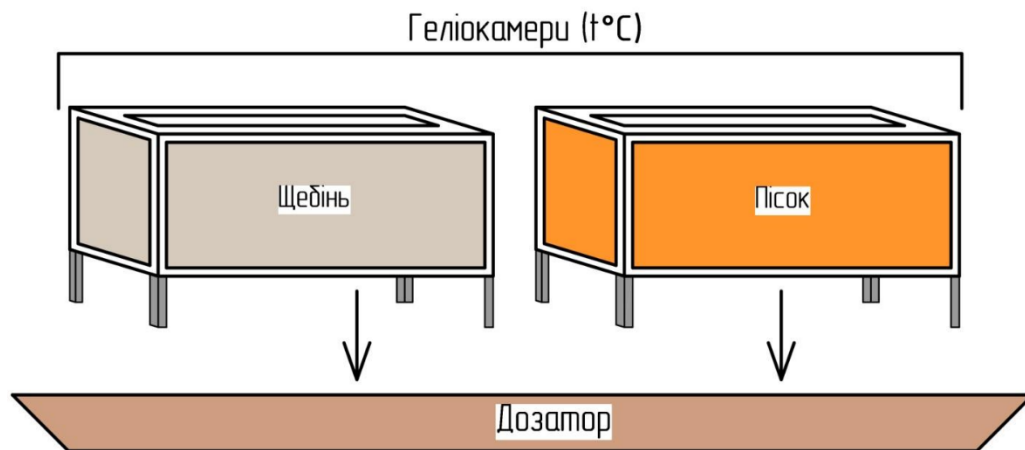


Рисунок 1.9 – Нагрівання заповнювачів в спеціальних геліокамерах [6]

Отже, з різних геліокамер можна формувати також технологічні лінії, у яких можуть реалізовуватися комбіновані методи теплового впливу на бетон із використанням традиційного теплоносія та сонячної енергії, але однак при цьому є неможливим використання привантаження.

У цих пристроях, що працюють за принципом «гарячого ящика», сонячна радіація перетворюється на теплову та акумулюється. У них також можливе нагрівання заповнювачів [29].

Визначають вплив на температурний режим теплосприймання матеріалу, кількості шарів прозорого огороження, теплоізоляції стін і днища геліокамери і орієнтації їх на місцевості. У пристроях парникового типу наявність вологи призводить до крапельної конденсації на поверхні цього плівкового прозорого огороження, внаслідок чого знижується проходження прямої сонячної радіації та зростає частка розсіяної [30].

Таким чином, наявність теплосприймаючого матеріалу у вигляді герметично замкненої оболонки в теплоізольованому коробі з прозорим огороженням із одношарової полімерної плівки дозволяє досягати температури в геліокамерв  $52^{\circ}\text{C}$  і вище в порівняно з температурою зовнішнього повітря. Різниця між максимальними температурами в камерах із теплосприймаючим матеріалом і без нього становить понад  $20^{\circ}\text{C}$ . Оптимальним є застосування двошарово прозорого покриття даху і стін геліокамери.

На температурний режим в геліокамері впливають умови надходження сонячної радіації на теплосприймаючу поверхню, пов'язані з орієнтацією пристрою на місцевості [31].

Максимального значення температура повітря в геліокамері досягає при орієнтації її довгою віссю на південний схід на  $30^{\circ}$ ; час досягнення цього значення припадає на 15–16 годину. Збільшення кута розвороту довгої осі до  $45^{\circ}$  у південно–східній та південно–західній орієнтації для раннього або більш пізнього проникнення сонячної радіації трохи знизило температуру повітря в геліокамері. Перевищення температури повітря в геліокамері в порівнянні з температурою середовища навколишнього простору при південно–західній, південній та південно–східній орієнтації на  $30^{\circ}$  становить  $55\text{--}60^{\circ}\text{C}$ , а при збільшенні кута повороту до  $45^{\circ}\text{C}$  –  $40\text{--}45^{\circ}\text{C}$ .

Таким чином, часу максимального припливу сонячної радіації при орієнтації геліокамер на  $30^\circ$  південний схід і на південний захід відповідає підвищення температура в середині геліокамери [32].

При проектуванні та виготовленні геліокамер необхідно забезпечувати вільну конвекцію навколо замкнутої оболонки та виключати утворення конденсату на поверхні прозорого огороження. Північна сторона геліокамер теплоізолюється з розрахунку запобігання тепловтрат в навколишнє середовище. Виходячи з умов оптимального теплообміну випромінюванням в замкнутому об'ємі розміри герметично замкнутою оболонки слід визначати відношенням  $4a \times 2a \times b$ , де  $a$  – найменша сторона прямокутного паралелепіпеда [33, 34].

Науковий і практичний інтерес становить вивчення процесів теплообміну в геліокамерах [35].

За температури зовнішнього повітря  $35\text{--}40^\circ\text{C}$  температура повітря в установці досягала  $70\text{--}80^\circ\text{C}$ , що є оптимальним режимом прогріву зразків [36].

Застосування в будівельному виробництві високих тисків пов'язане зі значними технічними труднощами і на сучасному етапі навряд чи є економічно доцільним (потреба в потужному силовому обладнанні і металоємких пресформах). Водночас низькі тиски цілком можуть бути використані для однотипних деталей невеликих розмірів, що випускаються серійно. При цьому доцільним є застосування сонячної енергії, що дозволяє не лише компенсувати витрати на ускладнені конструкції форм, а й отримати значний економічний ефект [37].

Суттєвим недоліком геліокамер є відсутність системи привантаження бетонних зразків під час теплової обробки. Це призводить до недостатнього ущільнення структури бетону в процесі тверднення, збільшення пористості та часткове утворення мікротріщин. У результаті знижується ефективність впливу на бетон, погіршуються фізико-механічні характеристики готових виробів, зокрема міцність, водонепроникність і довговічність. Відсутність привантаження також обмежує можливість отримання високоміцних бетонів

із щільною структурою, що є особливо важливим при використанні енергозберігаючих технологій та альтернативних джерел енергії [1,2,37].

Ефективність використання сонячної енергії для інтенсифікації тверднення бетону визначається оптичними та теплофізичними характеристиками геліосистем. У промисловій практиці та експериментальних дослідженнях найбільше поширення здобули чотири базові типи конструктивних рішень:

1. Термосифонні (пасивні) геліосистеми
2. Плоскі сонячні колектори (FPC – Flat Plate Collectors)
3. Вакуумні трубчасті колектори (ETC – Evacuated Tube Collectors)
4. Фокусуючі (концентраторні) геліосистеми (на прикладі параболоциліндричних)

Таблиця 1.2

**Комплексна порівняльна характеристика геліосистем для теплової обробки бетонів**

<b>Критерії порівняння</b>	<b>Пасивні (термосифонні) системи</b>	<b>Плоскі сонячні колектори (FPC)</b>	<b>Вакуумні трубчасті колектори (ETC)</b>	<b>Фокусуючі (концентраторні) геліосистеми</b>
Робочий діапазон температур, °C	35-55	50-80	70-130	>150
Оптичний ККД, %	45-55	70-78	65-72	60-75
Сприйняття дифузної (розсіяної) радіації	Високе	Високе	Помірне	Відсутнє (працюють лише на прямому світлі)
Чутливість до низьких температур повітря	Критична (високі втрати)	Висока (ефективність падає взимку)	Мінімальна (завдяки вакуумній ізоляції)	Низька

## Продовження таблиці

Ефективність інтеграції у термосилові установки (ТСУ)	Низька (не забезпечують стабільний напір і темп прогріву)	Оптимальна (покривають температурний оптимум бетону 65–70 °С влітку)	Висока (дозволяють працювати цілорічно та тримати стабільні 70 °С)	Низька (технічно й економічно недоцільно для локальних ТСУ)
---	---	--	--	---

На основі проведеного аналізу встановлено, що для забезпечення термосилових режимів виготовлення високоміцних бетонів (де оптимальна температура ізотермічної витримки становить 60–80 °С) найбільш раціональним є використання комбінації плоских та вакуумних трубчастих колекторів. Вакуумні системи гарантують стабільність температурного потенціалу в перехідні місяці та за умов мінливої хмарності, що дозволяє нівелювати деструктивні температурні градієнти в конструкціях, що тверднуть під тиском [121].

#### 1.4 Структура виробництва високоміцних бетонів

Одним із найбільш перспективних напрямів будівельного матеріалознавства ХХІ століття є створення надміцних бетонів із принципово новими характеристиками, що наближають їх до металів, кераміки, полімерів. Тому слід змінити підхід на технологію бетону, рішуче переглянувши ставлення до нього як до матеріалу, який сам по собі набуває необхідних властивостей [49, 82].

Бетонознавство і технологія бетону переживають період революційного розвитку, зумовленого застосуванням комплексних високоефективних хімічних і мінеральних добавок, дисперсного армування та інших технологічних рішень (рис. 1.9).

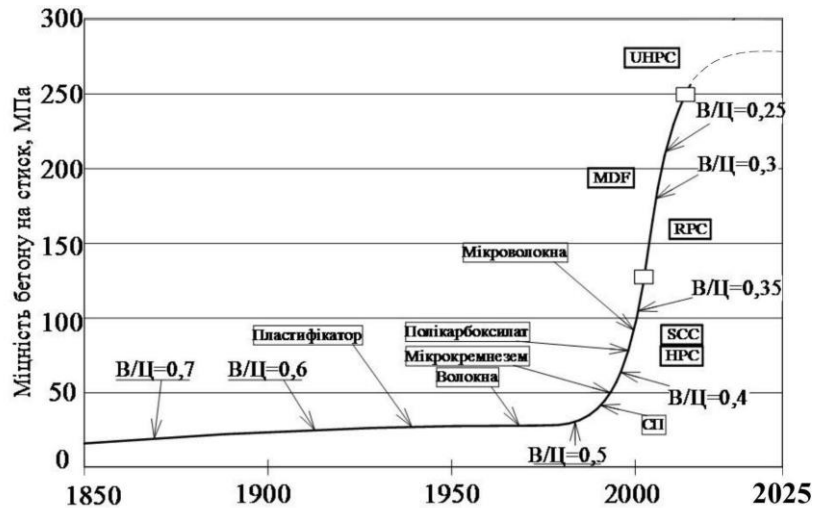


Рисунок 1.10 – Розвиток технології бетону та впливу водоцементного відношення [8]

Принципова зміна підходу до вибору і властивостей компонентів призвела до створення зовсім нових видів бетонів:

- високо функціональних – ВФБ; (НПС)
- самоущільнюючих – СУБ; (SCC)
- реакційно–порошкових – РПБ; (RPC)
- бездефектних – БДБ (MDF)
- бетони ультрависоких технологій (UHPC) [47,48].

Загальною закономірністю високоміцних бетонів являється висока міцність (>40 МПа) та рухомість при низькому водоцементному відношенні (<0,4) [50].

Головний принцип виготовлення таких бетонів полягає в мінімізації дефектів структури, що досягається наступним чином:

1. Правильний вибір компонентів, що відповідає методу укладання та ущільнення бетонної суміші;
2. Відповідність крупних частинок заповнювачів і в'язучого;
3. Зниження крихкості за рахунок введення добавок або фібри;

4. Підвищення щільності вкладеної суміші за рахунок оптимізації крупного заповнювача і тиску, що прикладається до і підчас тужавлення та тверднення бетону;

5. Покращення однорідності бетону за рахунок крупного заповнювача (рис. 1.11).

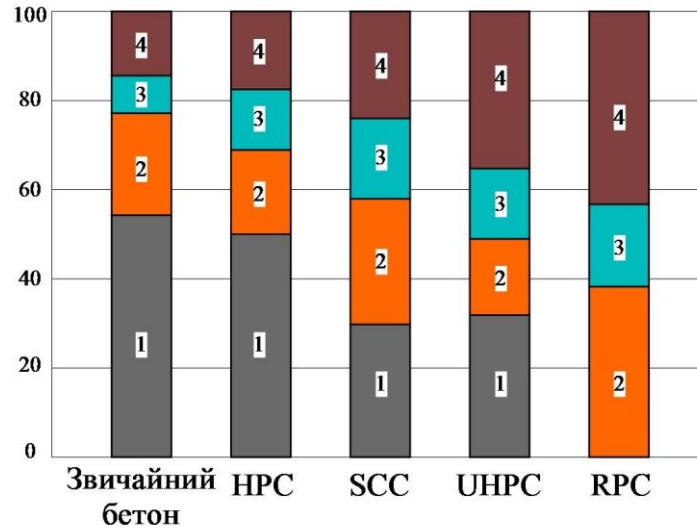


Рисунок 1.11 – Відношення і види компонентів високоміцних бетонів:

1 – щебінь; 2 – пісок; 3 – вода; 4 – порошок [7]

(HPC - високоексплуатаційний бетон, SCC - самоущільнювальний бетон, UHPC - ультрависокоміцний бетон, RPC - реакційно-порошковий бетон)

Як в'яжуче використовують пластифікований гідрофобний або звичайний портландцемент (ПЦ), які повинні мати найбільшу активність (не < 500–600) і найменшу нормальну густоту (не > 26%). Найбільш доцільним є використання портландцемент типу SEMI 52,5 відповідно до європейських стандартів [111].

Достатньо швидке наростання міцності в ранньому віці дозволяє зменшити до мінімуму використання різного роду прискорювачів тверднення бетону.

Як мілкий заповнювач використовують природні, штучні піски, що поставляються у вигляді двох фракцій – крупної (1,25 – 5 мм) і мілкої (1,4–0,62 мм) [52].

Як крупний заповнювач використовують щебінь, що отриманий шляхом подрібненням міцних гірських порід. Міцність щебеню при стиску має перевищувати міцність бетону не менше, щонайменше у 1,5 рази. Розмір фракцій становить 5–10мм і 10–20мм [40,41].

Міцність бетону збільшується зі зменшенням вмісту та розмірів фракцій заповнювачів. При чому для особливо міцних бетонів ( $K > 100$  МПа), розміри частинок заповнювача знаходяться на рівні дисперсності цементу (рис. 1.12)

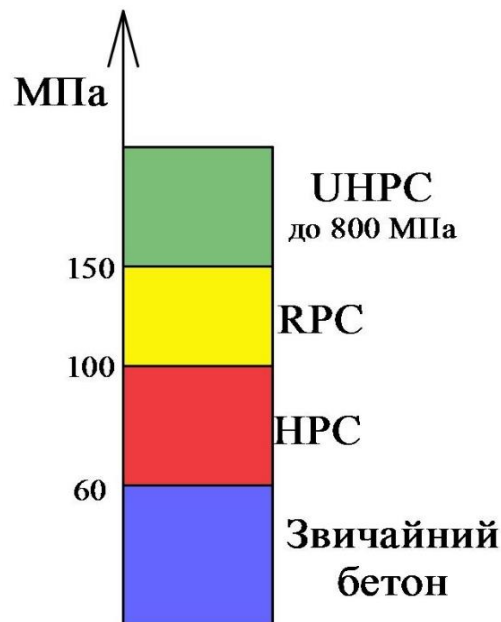


Рисунок 1.12 – Градація високоміцних бетонів за міцністю [6]:

НРС - високоексплуатаційний бетон, RPC - реакційно-порошковий бетон,  
УНРС - ультрависокоміцний бетон

Другою важливою відмінністю високоміцних бетонів від звичайних бетонів являється практично бездефектна структура, насамперед – дуже низька пористість [43, 44, 45].

Це зумовлено наявністю у складі високоміцних бетонів високодисперсних мінеральних компонентів – мікрокремнезему, золи уносу, мета каоліну та інших [42].

Так мікрокремнезем (МК), який має розмір частинок в 100 разів менший, ніж розмір зерен цементу заповнює між зерновий простір, що створює щільну

упаковку частинок ще на стадії змішування компонентів та ущільнення бетонної суміші (рис. 1.13)

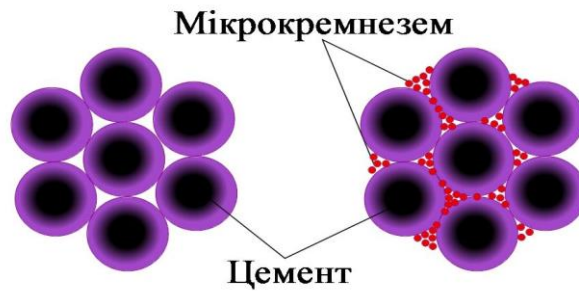


Рисунок 1.13 – Заповнення мікрокремнеземом зерен цементу [10]

Відбувається перерозподіл пор в бетоні – зменшується кількість капілярних пор і збільшується кількість гелевих пор (рис.1.14). У результаті формується щільний високоміцний бетон із новими властивостями. [43].

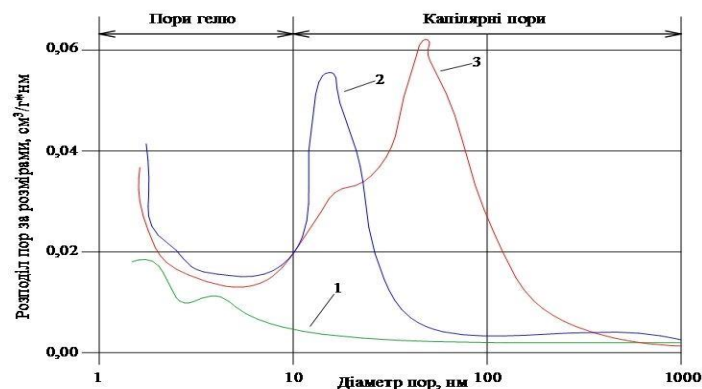


Рисунок 1.14 – Градація високоміцних бетонів за міцністю:

1 – звичайний бетон; 2 – високофункціональний НРС; 3 – бездефектний MDF [11]

Головну небезпеку при заморожуванні бетону становлять капілярні пори, які заповнені водою, яка кристалізується в них і спричиняє значні внутрішні напруження в бетонних виробках [110].

Зменшення розміру пор призводить до зниження температури, кристалізації порової води. Так, для бездефектних бетонів при діаметрі пор 4 Нм, температура кристалізації порової води становить  $-30^{\circ}\text{C}$ .

Ключовим фактором ВМБ є використання в їх складі МК, який має важливу здатність позитивно впливати на властивості бетону (міцність, морозостійкість, хімічна стійкість, сульфатостійкість),

МК зв'язує вільний оксид кальцію із розчину та дозволяє отримувати із рядових матеріалів бетони з високими експертними характеристиками і унікальними конструкційними можливостями [43–45].

При виготовленні ВМБ внаслідок дуже високої міцності їх (150 МПа) та, як наслідок, підвищення їх крихкості, обов'язковим є використання різних сталевих або поліпропіленових фібр. Вони підвищують тріщиностійкість, ударну міцність, в'язкість руйнування, зносостійкість, морозостійкість, опір кавітації, а також знижують усадку бетонів і повзучість [46, 112].

Це дає змогу використовувати більш ефективно, ніж при звичайному армуванні, використовувати конструктивні рішення у тонкостінних конструкціях, без стержневої, розподільної та поперечної арматури [108].

Створення самоущільнюючих бетонів, зумовлено необхідністю виключення людського фактору, який проявляється в нерівномірності ущільнення бетонної суміші під час її укладанні. Використання самоущільнюючого бетону дозволяє підвищити швидкість бетонування, знизити вимоги до перекачування суміші та гарантувати надійність заповнення всього об'єму опалубки при бетонуванні густо армованих ЗБК [47,113].

Як мінеральні добавки, що є важливою складовою сучасних бетонів, використовують вапнякові порошки, молотий доменний шлак, МК та інше [58].

Модифікатори в'язкості підвищують внутрішню зв'язаність самоущільнюючого бетону при його текучості та запобігають сегрегації крупного заповнювача за високої рухливості бетонної суміші [55,61].

До складу таких бетонів входить МК ( $S_{уд} = 3200 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), кварцева або базальтова мука ( $S_{уд} = 380 \text{ м}^2/\text{кг}$ ). Міцність порошкового бетону досягає 200 МПа [48].

До теперішнього часу не існує чіткого визначення для бетонів, які можна відносити до високоміцних. Умовна межа між бетонами рядовий і високої міцності змінюється в міру розвитку технології бетону. На сьогодні до високоміцних бетонів (High Strength Concrete) зазвичай бетони з міцністю при стисканні в 28-добовому віці 50–150 МПа. До високоміцним бетонів можна віднести і т.зв. високоякісні бетони (High Performance Concrete), які мають міцність на стиск у віці 2 діб 30–50 МПа, 28 діб – 60–150 МПа, морозостійкість – F600 і більше, водонепроникність – W12 і вище, водопоглинання – менше 1–2 %, стиранисть не більше 0,3 – 0,4 г/см<sup>2</sup>, а також регульовані показники деформативності [49].

Цього можна досягти за умови виконання ряду умов, що впливають з фізичних основ структуроутворення бетону: 1) застосування високоміцних цементів і заповнювачів; 2) забезпечення гранично низьким водоцементного відношення; 3) використання високої гранично-допустимої витрати цементу; 4) застосування суперпластифікаторів і комплексних добавок, що сприяють отриманню щільної структури бетону; 5) особливо ретельне перемішуванням і ущільненням бетонної суміші; 6) створення найбільш сприятливих умов тверднення бетону [50].

Основним напрямом досягнення високої міцності бетону є забезпечення гранично низького водоцементного відношення (В/Ц) при досить високому ступенні гідратації цементу та необхідному ущільненні бетонної суміші. При низьких значеннях В/Ц позитивно впливає на міцність бетону досягнення якісного співвідношення між вмістом щебеню і розчинної складової [51].

Заповнювачі для високоміцного бетону повинні бути чистими, із добре підібраним складом і малою пустотністю, а також, за можливості, не містити слабких зерен. Межа граничної міцності крупного заповнювача повина бути на 20% вище заданої міцності бетону. З підвищенням міцності бетону вплив заповнювача на структуру бетону і результати випробувань поступово збільшується. Для кожного заповнювача мається значення міцності бетону, вище якого отримання бетону на даному заповнювачі є складним і економічно

недоцільним, так як незначне підвищення міцності бетону супроводжується значним збільшенням витрати цементу. Зазвичай ця межа настає тоді, коли міцність бетону на розтяг наближається до міцності заповнювача. Для особливо високоміцних бетонів застосовують заповнювачі підвищеної міцності з діабазу, базальту та інших міцних гірських порід [52].

При постійному вмісті заповнювача міцність бетону при зміні В/Ц проходить через екстремальні точки, що відповідають такій структурі матеріалу, при якій мінімалізується його пористість. Обсяг пор в цементному камені, віднесений до одиниці маси цементу, описується простим рівнянням:

$$ПЦК = В / Ц - 0,23а, \quad (1.1)$$

де а—ступінь гідратації цементу, В / Ц – водо–цементне відношення.

Із збільшенням В/Ц при інших рівних умовах не лише зростає пористість цементного каменю, але й істотно вимірюється диференціальна пористість, тобто розподіл пор в одиниці об'єму бетону за їх радіусами. Встановлено, що навіть при невеликій зміні В/Ц збільшується радіус капілярів [53].

Експериментально встановлено, що для високоміцних бетонів можливе застосування дрібних пісків за умови відсутності в них пилюватих і глинистих домішок. Так, у дослідях Н.І. Ситника і А. Л. Каліщука показана можливість отримання бетонів міцністю 80–100 МПа при використанні дрібного піску з модулем крупності  $M_k = 1,54$  [54].

Радикальним способом зменшення В/Ц без істотного погіршення легкоукладальності бетонної суміші є введення добавок суперпластифікаторів (СП). На відміну від звичайних пластифікаторів, що знижують витрату води до 10–5%, СП дозволяють скорочувати витрату води на 20–30% і більше, а відповідно збільшувати міцність бетонів. Регулюванням кількості СП і В/Ц можуть бути отримані бетони з високою міцністю. При достатньо високому дозуванні добавки вона може зростати в 2–3 рази [55,119].

Досягнення досить низьких значень В/Ц при підвищених витратах цементу суперечить правилу постійної водопотреби. Збільшення витрати цементу понад 350–400 кг/м<sup>3</sup> і, відповідно, критичного В / Ц призводить до

зростання необхідної витрати води. Це, в свою чергу, знову потребує збільшення витрати цементу для  $V/C = \text{const}$  і т.д. [56].

Введення суперпластифікаторів дозволяє істотно зменшити водомісткість цементу та бетонної суміші і розірвати так зване «замкнуте кільце», суттєво знизивши  $(V/C)$  [57,119].

Введення суперпластифікаторів є особливо ефективним для зниження витрат цементу, оскільки цьому сприяють не тільки різке підвищення рухливості та покращення ущільнення бетонної суміші, а й збереження сталої водопотреби при високих витратах цементу (до 550 кг / м<sup>3</sup>), тобто в цьому випадку не потрібно додаткової витрати цементу для компенсації підвищеної в'язкості бетонної суміші. В результаті підвищується ефективність використання цементу в високоміцних бетонах [58,95].

Міцність бетону практично лінійно зростає із збільшенням активності цементу. Високоміцні бетони класів В50–В80 можна виготовляти при помірних  $V/C$ , використовуючи цементні марки М700–М800. У промисловості існує досвід застосування таких цементів переважно за рахунок збільшення складу аліта в клінкері до 60–65% і підвищенні питомої поверхні цементу до 4000–4500 см<sup>2</sup>/м. Бетони на зазначених цементах набирають через добу твердіння в природних умовах 20–40% і через три доби 50–70% марочної міцності. Проте виробництво таких цементів характеризується високою енергоємністю і не набуло поширення [43].

До ефективних в'язучих для високоміцних бетонів належать в'язучі з низькою водомісткістю (ВНВ), які отримують шляхом тонкого помелу портландцементного клінкеру і мінеральної добавки з введенням порошкоподібного суперпластифікатора. ВНВ характеризується високою дисперсністю (8 уд = 4000–5000 см<sup>2</sup>/г), низькою водомісткістю ( $K_{НВ} = 16–20\%$ ) та активністю до 100 МПа.

Водомісткість бетонних сумішей на ВНВ на 35–50% нижча, ніж на вихідному портландцементі. Їх характерними особливостями є підвищена чутливість показників до зміни витрати води, підвищена в'язкість в стані

спокою та покращенні тиксотропні властивості. Бетони на ВНВ характеризуються інтенсивним набором міцності вже через кілька годин, а до 1 доби їх міцність може досягати до 60 МПа.

Ефективною відпускнуою формою мікрокремнезему є гранульований продукт – модифікатор, що містить залежно від марки містить 7–15% сухого суперпластифікатора.

Підвищення міцності бетону за рахунок введення МК обґрунтовується комплексом особливих властивостей цього матеріалу і насамперед його підвищеною пуцолановою активністю, здатністю покращувати мікроструктуру цементного каменю.

Цементний гель, представлений в основному гідросилікатами типу С–Б–Н, має міцність, що практично вдвічі перевищує міцність гідросилікатів типу С–8–Н, які утворюються в бетонах без модифікаторів.. Кінетика твердіння бетонів з МК у нормальних умовах характеризується інтенсивним наростанням міцності в інтервалі від 7 до 28 діб. В умовах обробки за традиційними режимами пропарювання досягається міцність до 90% марочної. Рекомендована кількість добавки МК становить 5–15% маси цементу.

Для високоміцних бетонів, які містять поряд з суперпластифікаторами містять високодисперсні кремнеземисті і алюмокремнеземисті добавки, характерні висока стабільність рухливості суміші в часі та мінімальні втрати.

Для високоміцних бетонів із добавками модифікаторів характерні підвищені значення пружних властивостей і верхніх меж мікротріщин. Деформації усадки можуть бути практично відсутні або мати гранично низькі значення. Повзучість таких бетонів зазвичай істотно нижче за нормовані значення [112].

## 1.5 Методика підготовки виробництва високоміцних бетонів

Підбір складу бетонної суміші, що твердіє під термосиловим впливом, має низку особливостей, які відрізняються від традиційних вимог до бетону. Окрім забезпечення необхідної рухливості та досягнення заданої міцності у встановлені терміни, враховуються специфічні технологічні фактори, що визначають на ефективність пресування та формування структури [60].

Особлива увага при підборі складу приділяється співвідношенню великого та дрібного заповнювача, коефіцієнту розсунення зерен великого заповнювача (Крозс) та кількості цементу в суміші. Для оптимізації пресування важливо уникати каркасування великого заповнювача, коли тиск передається між його частинами без участі цементного тіста. Досягти цього можна, збільшивши об'єм розчинної частини та зменшивши концентрацію заповнювача, тобто підвищивши Крозс [59-65].

Каркасування може виникати також у дрібного заповнювача, коли ущільнення розчинної частини та видалення частини вологи призводить до різкого зростання опору суміші зрізу. Це явище підтверджує можливість виготовлення бетонів без великого заповнювача за певних умов.

Зниження об'ємної концентрації цементного тіста також зменшує рухливість суміші. Відомо, що при використанні менше 250 кг цементу на 1 м<sup>3</sup> ефективність пресування різко знижується, оскільки дрібний заповнювач утворює стійкий каркас, який не передає тиск цементному тілу – основному джерелу міцності [59–65].

Отже, при підборі складу бетону для твердіння під тиском необхідно дотримуватися таких умов:

- коефіцієнт розсунення зерен Крозс = 1,5–1,6;
- об'ємна концентрація цементного тіста  $\geq 0,25$ .

Ці вимоги можуть бути реалізовані, зокрема, шляхом зниження марки бетону при збереженні високої віддачі від пресування. До моменту розробки спеціальних нормативів для бетонів, що твердіють під тиском, доцільно

користуватися накопиченим досвідом підбору складів звичайних бетонів з урахуванням технологічних особливостей термосилового впливу. Зокрема, для оптимізації складу активно використовуються підходи багатопараметричного проектування О.Л. Дворкіна [59, 60, 95].

У його досліджах підбір складу здійснюється через визначення вихідної міцності суміші  $R_0$ , що після термосилового твердіння дає кінцеву міцність  $R^T$ :

$$R^T = K \cdot R_0, \quad (1.2)$$

де  $K$  – коефіцієнт підсилення міцності під тиском [66].

Попередній підбір складу проводиться за алгоритмом:

1. Визначають орієнтовний коефіцієнт зміцнення бетону за формулою:

$$K = 1 + \alpha, \quad K = 1 + \alpha, \quad K = 1 + \alpha, \quad (1.3)$$

де  $\alpha$  враховує вплив пресувального тиску  $P$  на структуру суміші.

2. За заданою міцністю виробу  $R^T$  обчислити необхідну міцність вихідної суміші  $R_0$ .

3. Підбір складу ведеться як для звичайного бетону, з урахуванням умов термосилового впливу, визначаючи необхідне водоцементне відношення.

4. Витрати води для бетонної суміші визначають за відповідними таблицями.

Такий підхід дозволяє підвищити ефективність термосилового твердіння, оптимізувати структуру суміші та забезпечити високі фізико–механічних властивостей бетонних виробів.

Температурний режим є одним із ключових факторів, що визначають інтенсивність твердіння бетону на ранніх стадіях та формування його фізико–механічних властивостей. Підвищення температури в процесі термосилового впливу суттєво прискорює гідратацію цементних мінералів, активізує накопичення потенціаловизначаючих іонів у цементному тісті та прискорює перебіг електрохімічних реакцій [66–71].

У сучасному виробництві бетонних виробів для скорочення часу тривалості твердіння використовують різноманітні методи: гаряче та пульсуюче пресування, віброгідропресування, автоклавну обробку, електромагнітний нагрів під тиском, а також комплексну активацію бетонних сумішей. Термосиловий вплив поєднує підвищену температуру з механічним навантаженням, що забезпечує прискорене структуроутворення, підвищену якість матеріалу та зменшення тривалості технологічного циклу [66–71].

Термосилова технологія базується на синергетичному ефекті взаємодії температури, тиску та механічного впливу на ранніх стадіях твердіння. Такий комбінований вплив підсилює позитивні ефекти кожного з чинників і нейтралізує їхні можливі негативні впливи на структуру бетону [1, 2, 38].

Міцність бетону залежить як від температури складових суміші, так і від режиму твердіння. Підвищення температури під час пропарювання збільшує рівень напружень у контактних зонах між заповнювачем і розчинною частиною, що може призводити до утворення локальних дефектів. Оптимальна температура для пропареного бетону трохи перевищує температуру природного твердіння. Вологість підсилює негативні ефекти, оскільки вода підвищує адсорбційні навантаження у порах та порожнинах бетону [72].

Експериментальні дані підтверджують, що режим твердіння істотно впливає на кінцеву міцність: жорстке пропарювання призводить до зниження показників, тоді як м'який режим і природне твердіння забезпечують щільну та однорідну структуру з мінімальними внутрішніми напруженнями [82,116].

Особливу увагу слід приділяти попередній витримці виробів, швидкості підвищення температури та тривалості ізотермічного прогріву. Період попередньої витримки має відповідати часу формування структури бетону (3–4 год). Його скорочення без застосування прискорювачів призводить до істинного зниження міцності [73].

Висока швидкість нагріву в жорсткому режимі може призводити до порушення структури бетону, тоді як м'який режим із контрольованим

підйомом температури дозволяє досягати міцності, що не поступається природному твердінню. Для бетонів підвищеної міцності із портландцементом оптимальна температура ізотермічного прогріву не перевищує 80 °С.

Швидкість охолодження виробів також суттєво впливає на міцність: прискорене охолодження сприяє утворенню дефектів у структурі, особливо у масивних виробках і при великому розмірі зерен щебеню. Контрольоване охолодження забезпечує збереження цілісності контактів між заповнювачем та розчином і запобігає порушенню структури цементного каменю [73,114,115].

## **1.6 Висновки до розділу 1**

1. У першому розділі дисертаційної роботи проведено комплексний аналіз сучасних технологій теплової та термосилової обробки бетонів, досліджено існуюче обладнання для прискореного тверднення виробів, розглянуто можливості використання сонячної енергії у технологічних процесах, а також проаналізовано особливості виробництва високоміцних бетонів.

2. Встановлено, що термосилова технологія, яка базується на поєднаному впливі температури та зовнішнього тиску на бетонну суміш, забезпечує суттєве прискорення процесів гідратації цементу, ущільнення структури цементного каменю та підвищення ранньої міцності бетонів. Аналіз наукових праць українських і зарубіжних дослідників підтвердив ефективність комбінованого термосилового впливу для отримання бетонів із покращеними фізико–механічними характеристиками та зменшення тривалості теплової обробки.

3. Дослідження показали, що основними напрямками розвитку сучасних технологій теплової обробки бетонів є підвищення енергоефективності процесів, оптимізація температурних режимів, вдосконалення структури цементного каменю та використання

альтернативних джерел енергії. Особливу увагу приділено роботам вітчизняних науковців, зокрема професора І.Н. Дударя, В.В. Швеця та В.Л. Гарнаги, які сформувавши наукову основу термосилової технології бетонів та довели ефективність поєднання теплового, вібраційного і силового впливу.

4. У результаті аналізу існуючого обладнання для теплової обробки бетонних виробів встановлено, що традиційні пропарювальні камери та автоклавні установки характеризуються значними тепловими втратами й високими енергетичними витратами. Найбільш перспективними для виготовлення високоміцних бетонів визначено пакетні установки, які забезпечують високу точність дозування компонентів, компактність, кращий контроль температурно–вологісних режимів та можливість отримання виробів із заданими характеристиками. Водночас основним недоліком таких установок залишаються значні витрати теплової енергії.

5. Проведений аналіз геліотехнічних систем показав доцільність використання сонячної енергії у процесах термообробки бетонів. Встановлено, що застосування геліокамер і сонячних колекторів дозволяє отримувати температури нагріву бетонних виробів у межах 50–80 °С, що відповідає оптимальним режимам теплової обробки. Використання сонячної енергії дає змогу суттєво знизити витрати традиційних енергоносіїв та підвищити енергоефективність технологічного процесу. Разом із тим виявлено, що існуючі геліокамери не забезпечують можливості привантаження бетонних виробів у процесі тверднення, що негативно впливає на ущільнення структури та кінцеві фізико–механічні властивості бетону.

6. У роботі обґрунтовано перспективність створення пакетної термосилової установки із застосуванням сонячної енергії, яка дозволить поєднати переваги термосилового впливу та альтернативних джерел енергії. Запропонований напрям досліджень спрямований на зменшення енерговитрат, підвищення міцності бетонів та вдосконалення структури матеріалу за рахунок комплексного впливу температури й привантаження.

7. Також у розділі розглянуто сучасні підходи до виробництва високоміцних бетонів. Встановлено, що основними умовами отримання високоміцних бетонів є зниження водоцементного відношення, оптимізація зернового складу заповнювачів, використання суперпластифікаторів, мікрокремнезему та інших мінеральних добавок, а також забезпечення оптимальних умов тверднення. Показано, що термосилова технологія створює сприятливі умови для формування щільної бездефектної структури цементного каменю та отримання бетонів із високими показниками міцності, морозостійкості та довговічності.

8. На основі проведеного аналізу сформульовано робочу гіпотезу дослідження, яка полягає у можливості зниження енергетичних витрат термосилової технології за рахунок використання сонячної енергії при одночасному забезпеченні високих фізико–механічних характеристик бетонних виробів. Це визначає необхідність подальшого теоретичного та експериментального обґрунтування параметрів нової пакетної термосилової установки з комбінованим використанням традиційних і альтернативних джерел теплової енергії.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОСИЛОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПІДБІР СКЛАДУ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ

#### 2.1. Методологічні засади експериментальних досліджень

У дослідженнях використовувалися стандартні рекомендації, методики та вказівки відповідних норм.

Дослідження проводилися з використанням сучасного програмного забезпечення COMSOL Multiphysics (навчальна версія Class Kit License), що дозволило реалізувати моделювання процесів, виконати відповідні розрахунки та здійснити аналіз отриманих результатів із необхідною точністю та відтворюваністю [117, 118].

Для вивчення способу твердіння та процесів використовувалася спеціальна пакетна термосилова установка (рис 2.1), що дозволяла визначати відповідні характеристики [3].

Для об'єктивної характеристики режимів термообробки на бетонних виробів температурне поле під час досліджень вимірялося у 20 точках. Вимірювання температур проводилися спочатку через 20 хвилин, а потім через кожні 30 хвилин протягом усього циклу обробки.

Дослідам піддавалися бетонні кубики розміром  $100 \times 100 \times 100$  мм.

Щільність, морозостійкість та водопоглинення визначалися за сучасними стандартними методиками.

Під час фізичних досліджень виготовлявся касельський бордюр – це спеціальний дорожній бортовий елемент, розроблений у місті Кассель (Німеччина) для забезпечення комфортного та безпечної стикування транспорту з посадковою платформою або паркувальними місцями.

## 2.2 Обґрунтування пакетної термосилової установки

Для формування бетонів з оптимальною структурою та наперед заданими експлуатаційними властивостями у сучасній технології бетону застосовується принцип оптимізації технологічних процесів. Вибір раціонального технологічного рішення є складним та актуальною науково–практичними завданнями, оскільки передбачає узгодження кількох взаємопов'язаних факторів [49].

У теорії та практиці розрізняють два основні підходи до оптимізації:

- досягнення заданого результату (необхідної міцності бетону) за мінімальних витрат матеріальних та енергетичних ресурсів;
- одержання максимального ефекту (найвищої міцності бетону) за фіксованих ресурсних обмежень.

У даній роботі реалізовано другий підхід, спрямований на досягнення максимально можливого ефекту за заданих ресурсів, тобто на більш повне використання внутрішніх резервів міцності бетону шляхом комплексного та взаємоузгодженого впливу вібрації, механічного тиску й температури. Такий підхід дозволяє інтенсифікувати процеси структуроутворення без істотного збільшення витрат в'язучих або енергоносіїв.

Для оптимізації технологічної системи необхідно сформулювати критерій ефективності, який кількісно відображає ступінь досягнення поставленої мети. За найбільш раціональних умов цей критерій набуває екстремального (максимального або мінімального) значення, що у даному випадку характеризується приростом міцності бетону. Складність вибору критерію ефективності полягає в тому, що на практиці зазвичай існує декілька можливих критеріїв, оптимальні значення яких, як правило, не збігаються. За таких умов доцільно виділяти основний критерій оптимізації та встановлювати допустимі межі зміни технологічних параметрів, у яких забезпечується ефективний перебіг процесу [74–80].

З метою вивчення впливу параметрів і різних режимів термосилових

впливів на фізико–механічні та структурні властивості бетону під час прогрівання під різним тиском була розглянуто існуючу спеціальну лабораторну установку, принципова схема якої наведена на рисунок 2.1.

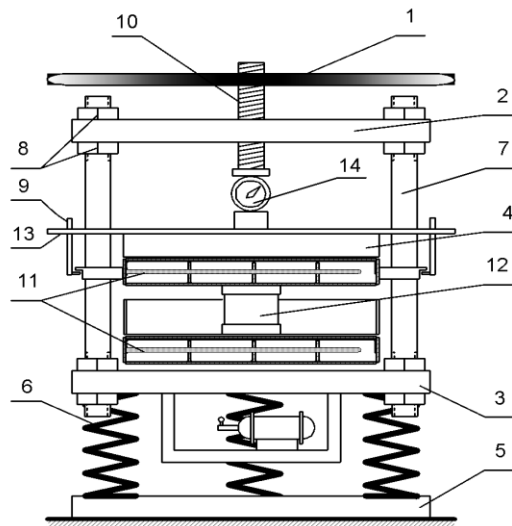


Рисунок 2.1 – Лабораторна модель вібротермосилової установки [10]

Існуюча пакетна вібротермосилова установка забезпечує можливість виготовлення плоских та малогабаритних бетонних виробів, зокрема тротуарної плитки, без використання потужного пресового обладнання, а також без залучення великогабаритних і дорогих пропарювальних камер та автоклавів, які традиційно застосовуються більшістю виробників аналогічної продукції. Запропонований для впровадження варіант має габаритні розміри  $500 \times 500 \times 1500$  мм (L×B×H).

Основною проблемою даної вібротермосилової установки є підвищені енергозатрати та значна тривалість процесу ущільнення, що обумовлено інтенсивним режимом вібраційного впливу. Саме вібраційна складова процесу є найбільш енергоємною, оскільки потребує безперервної роботи приводів із високим навантаженням, а також призводить до зростання загального часу формування виробів. Це, у свою чергу, знижує продуктивність установки та підвищує питомі витрати енергії на одиницю продукції.

У зв'язку з виявленими недоліками базової конструкції в цій роботі була розроблено вдосконалену модель термосилової установки, в якій принципово

переглянуто підходи до формування ущільнюючого впливу на бетонні зразки. Зокрема, повністю виключено застосування вібраційних пружин, що дозволило усунути найбільш енергоємний елемент системи та зменшити втрати енергії [81–90].

Конструкцію установки доповнено модернізованими термоблоками, які забезпечують більш рівномірний тепловий вплив по всьому об'єму виробу.

Окремим елементом удосконалення стало впровадження динамометра для оперативного контролю та фіксації величини тиску в процесі формування.

У сукупності запропоновані конструктивні зміни забезпечують більш енергоефективний режим роботи установки та можливість під'єднання сонячного колектора [91].

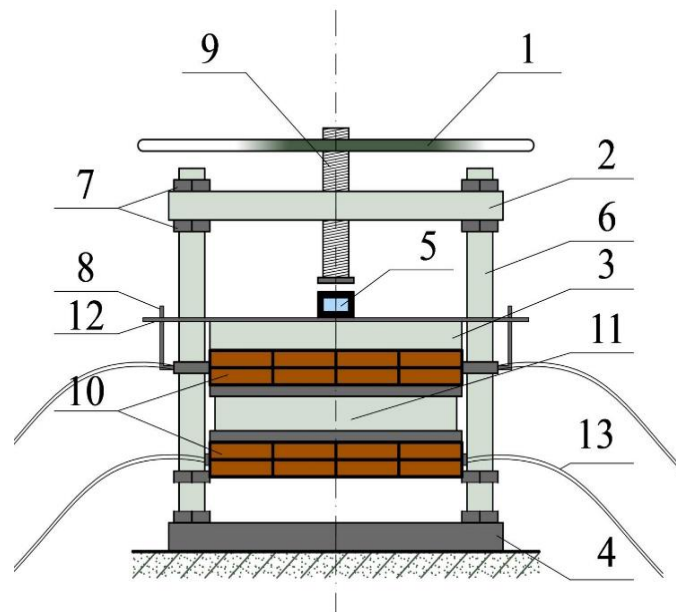


Рисунок 2.2 – Пакетна термосилова установка: 1–важель; 2–верхня плита; 3–віброплита; 4–основа; 5–динамометр; 6–направляючі колонки; 7–гайки; 8–арматура; 9–шток; 10–термоблоки; 11–прес-форма; 12–арматура; 13–гнучкі штанги

*Джерело: сформовано автором*

Установка складається з основи 4, на якій встановлені направляючі колонки 6, що закріплені за допомогою гайок 7. У центрі верхньої плити 2

зроблений отвір з різьбою для закріплення та переміщення пресувального обладнання, яке складається з важеля 1 та штока 9.

Шток 9 з'єднаний з рухомою плитою 3 і служить для розподілу тиску по всій поверхню термоблока 10, до якого приєднані гнучкі штанги 13. Між термоблоками розташована прес-форма 11. Арматура 8 та 12 з'єднана з рухомою плитою 3.

### **2.3 Вплив сонячної енергії на обробку високоміцних бетонів при моделюванні термосилової технології**

Використання сонячної енергії у процесах термосилової обробки високоміцних бетонів відкриває можливість суттєво підвищити енергоефективність виробництва, зменшити вуглецевий слід і забезпечити стабільні режими тверднення без значних експлуатаційних витрат. Бетони класів В45–В60, що характеризуються низьким водоцементним відношенням (0,28–0,33) демонструють високу чутливість до теплових режимів у перші 24–48 годин, що важливо враховувати під час моделювання.

Сонячна енергія може бути інтегрована у термосилову технологію кількома способами: через сонячні колектори, які нагрівають теплоносії для підтримання температури в камерах тверднення, або через фотовольтаїчні системи, що живлять електричні нагрівальні елементи чи теплові насоси. На відміну від традиційної парової обробки, сонячний прогрів дозволяє підтримувати м'які температурні режими в межах 45–65 °С, що є оптимальними для гідратації цементу СЕМ І 42,5R та 52,5R, мінімізуючи температурні напруження та ризик поверхневого пересихання [91–95].

Унаслідок такого теплового впливу знижується капілярна пористість і підвищується щільність цементного каменю, що безпосередньо впливає на кінцеву міцність бетону. За правильно підібраного температурного графіка термосилова технологія з використанням сонячної енергії забезпечує 70–80 % проєктної міцності вже через 24 години, що особливо важливо для

виробництва високоміцних бордюрів (зокрема Кассельського профілю), які повинні витримувати високе точкове навантаження та інтенсивне абразивне зношування [96–100].

Крім того, стабілізація теплового середовища, яку забезпечують системи акумуляції сонячного тепла, позитивно впливає на морозостійкість бетону: рівномірне тверднення сприяє формуванню більш щільної структури, що забезпечує досягнення показників F200–F300 без надмірних витрат енергії. Для виробів транспортної інфраструктури це є критично важливо, оскільки вони перебувають у зоні зволоження та зазнають частих циклів заморожування–відтавання.

Таким чином, використання сонячної енергії в термосилової технології високоміцних бетонів не лише забезпечує стале та екологічно безпечний виробничий процес, але й сприяє поліпшенню механічних властивостей, довговічності, морозостійкості та стиранності бетонних виробів. Це робить даний підхід перспективним напрямом розвитку сучасних технологій виготовлення інфраструктурних елементів, особливо у міських транспортних системах. Вміст води згідно з даними, наведеними в наукових роботах, для високоміцних бетонів перебуває у відносно широкому діапазоні – від 140 до 220 л/м<sup>3</sup> [101].

Витрату цементу розраховують виходячи із загального об'єму дисперсної суміші, з урахуванням оптимальних співвідношень маси заповнювачів до маси цементу [58, 102].

Дослідження дозволяють виділити декілька типових варіантів бетонних сумішей, що забезпечують оптимальні фізико–механічні властивості для різних конструктивних елементів: від плоских плит і панелей до масивних високонавантажених виробів. Такий підхід забезпечує гнучкість технології та ефективність виробництва високоміцних бетонних виробів.

**Втрата вологи при температурних режимах [25]**

Температура, С	В/Ц	Процес
40	12	активна гідратація, незначна втрата вологи
50	10	починається помірне випаровування
60	8	стабільний баланс гідратації та втрат
70	6	помітне висушування, особливо на поверхні
80	4	інтенсивна втрата вологи, ризик пересушування

Таблиця 2.2

**Склад бетонної суміші [26]**

Суміш	Тип цементу	В/Ц	Великі заповнювачі (%)	Дрібні заповнювачі (%)	Температура прогріву (°С)	Тиск під час обробки (МПа)
1	Портландцемент М500	0,30	60	40	70	1,4
2	Портландцемент М500	0,38	50	50	65	1,2
3	Портландцемент М400	0,42	55	45	70	1,5
4	Шлакопортландцемент М400	0,41	60	40	75	1,4

Прогнозовані порівняльні графіки залежності міцності бетону від температури прогрівання та тиску привантаження дають змогу визначити параметри, які необхідно задати під час моделювання [102].

З наведених графіків видно, що найкращий результат показала Суміш А, на основі Портландцементу М500. Температура прогрівання не повинна перевищувати 75 °С. Найменшу міцність на стиск показала суміш 4 (рис. 2.3).

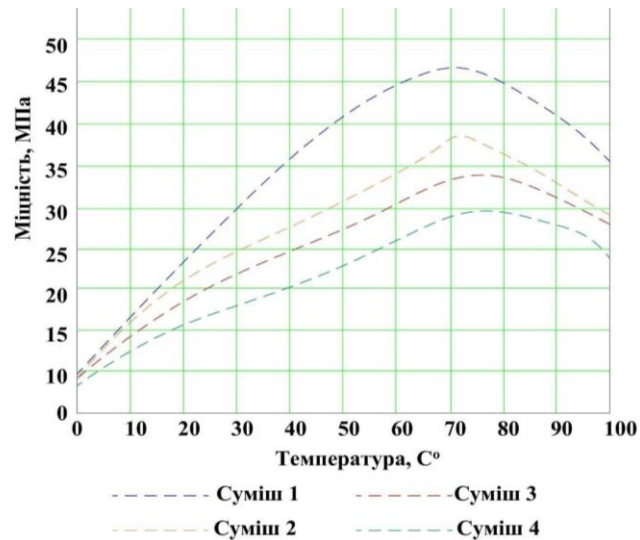


Рисунок 2.3 – Зростання міцності бетону залежно від величини температури прогрівання в геліокамері

*Джерело: сформовано автором*

Величина прикладеного тиску має коливатися від 0,2 до 0,6 МПа (рис.2.4).

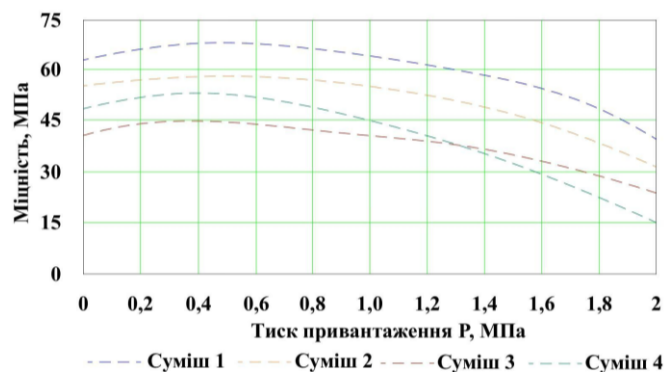


Рисунок 2.4 – Зростання міцності бетону залежно від величини тиску, що прикладається

*Джерело: сформовано автором*

## 2.4 Опис характеристик використаних матеріалів

З попереднього аналізу випливає, що під дією підвищених температур і тиску практично всі види цементів здатні до інтенсивного тверднення, однак вибір в'язучого визначається конкретними технологічними умовами та вимогами до вибору. Для таких умов водоцементне відношення зазвичай знаходиться в межах 0,30–0,45, що забезпечує оптимальний баланс між рухливістю суміші та щільністю структури. У формуванні міцності бетону важливу роль відіграють процеси, що відбуваються в контактній зоні «цементний камінь – заповнювач». Їх інтенсивність залежить від мінералогічного складу цементу та властивостей піску і щебеню [103,104].

Як показав аналіз для прискорення набору міцності доцільно використовувати цементи з підвищеним вмістом алітової та алюмінатної фаз ( $C_3S$  і  $C_3A$ ), а також застосовувати методи активації цементного тіста. Механічна та хімічна активація дозволяє підвищити ранню міцність бетону більш ніж на 30 %, а у віці 28 діб – на 15–20 %, що істотно покращує експлуатаційні характеристики матеріалу.

У наших дослідженнях використовувався портландцемент М500. Основні фізико–механічні властивості цементу наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

### Фізико–механічні характеристики

В'язуче	Нормальна густина	Строки тужавлення, год.		Тонкість помолу (залишок на ситі 008), %	Істинна густина, кг/м <sup>3</sup>	Питома поверхня, см <sup>2</sup> /г
		початок	кінець			
Портландцемент М 500	25	1,0	4,0	14	3100	3400

Джерело: сформовано автором

**Хімічний склад**

В'язуче	Вміст оксидів, %							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	n.n.n
Портландцемент М 500	23	5	4	62	1	0,5	2	2,50

*Джерело: сформовано автором*

Для отримання бетону класу 500 і вище необхідно враховувати міцність зерен дрібного заповнювача. Для звичайних бетонів достатньо міцності кварцових пісків, однак для високоміцних складів міцність зерен піску та щебеню повинна перевищувати 150 МПа. Доцільним є використання дробленого піску з міцних гірських порід [105–110]

Таблиця 2.5

**Характеристики дрібних заповнювачів**

Вид заповнювача	Характеристики					
	насипна густина, кг/м <sup>3</sup>	істинна густина, кг/м <sup>3</sup>	порожн істість, %	модуль крупності	питома поверхня, см <sup>2</sup> /г	вміст пиловидних і глинистих частинок, %
Пісок (дніпровський)	1440	2630	42,0	1,3	42,5	0,5

*Джерело: сформовано автором*

Важливу роль у формуванні структури високоміцного бетону відіграють характеристики піску та щебеню. Піщана складова, формуючи мезоструктуру матеріалу, визначає розвиток мікроструктури бетону. Властивості піску впливають на формування цементної матриці, оскільки оптимальна товщина розчинної плівки на зернах щебеню залежить не лише від в'язкості цементного

розчину, а й від середньої крупності піску. При зменшенні розміру піщаних зерен зростає відносна товщина цементної плівки, необхідної для їх склеювання. Тому для отримання високоміцних і довговічних бетонів рекомендується застосовувати чисті крупно– або середньозернисті піски [111–120].

Таблиця 2.6

### Характеристика крупного заповнювача

Показники	Щебінь гранітний
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	2700
Насипна щільність, кг/м <sup>3</sup>	1350
Пустотність, %	48,0
Забрудненність, %	1,2
Гранулометричний склад, мм	
20	21,5
10	70
5	98,8

*Джерело: сформовано автором*

Таблиця 2.7

### Співвідношення компонентів високоміцного бетону

Компоненти	Показник
Цемент (Ц)	1
Пісок (П)	1,24
Щебінь гранітний (Щ)	2,2
Водоцементне відношення (В/Ц)	0,30–0,36

*Джерело: сформовано автором*

$$Ц:П:Щ:В/Ц = 1:1,24:2,2:0,33 \quad (2.1)$$

Приклад розрахунку:

- кількість цементу: 500 кг/м<sup>3</sup>

- кількість піску:  $500 \text{ кг/м}^3 \times 1,24 = 620 \text{ кг/м}^3$
- щебінь гранітний:  $500 \text{ кг/м}^3 \times 2,2 = 1100 \text{ кг/м}^3$
- водоцементне відношення:  $500 \text{ кг/м}^3 \times 0,33 = 165 \text{ л}$

## **2.5 Планування багатофакторного експерименту та параметрична оптимізація показників міцності бетону**

Для визначення оптимальних параметрів термосилової обробки бетонів у термос–установці було застосовано метод математичного планування експерименту – повнофакторний експеримент типу:

$$N = 2^3$$

Застосування даного методу дозволило встановити ступінь впливу основних технологічних факторів на ранню та кінцеву міцність бетону, а також визначити характер взаємодії між окремими параметрами процесу.

На відміну від класичних вібротермосилових технологій, у даній роботі виключено фактор повторного вібрування. Основна увага приділялася енергоефективному термос–режиму тверднення бетонів із використанням ізольованої теплової камери.

Як незалежні фактори дослідження були прийняті:

- $X_1$  – температура прогріву бетонної суміші;
- $X_2$  – величина зовнішнього тиску;
- $X_3$  – тривалість теплової обробки.

Основною функцією відгуку приймалася міцність бетону на стиск через 24 години тверднення:  $R_{24}$ , МПа

Додатково аналізувалася міцність через 28 діб:  $R_{28}$ , МПа.

Для проведення досліджень використовувався бетон класу В50. Вибір факторів здійснювався на основі аналізу результатів попередніх досліджень та технологічних особливостей термосилової обробки бетонів.

## Рівні варіювання факторів

Фактор	Позначення	Нижній рівень (-1)	Центральний рівень (0)	Верхній рівень (+1)	Інтервал варіювання
Температура прогріву, °С	X1	50	60	70	10
Тиск привантаження, МПа	X2	0,10	0,20	0,30	0,1
Тривалість прогріву, год	X3	4	5	6	1

*Джерело: сформовано автором*

Кодування факторів здійснювалось за залежністю:

$$X_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta X_i} \quad (2.2)$$

де:  $x_i$  – кодоване значення фактора;  $X_i$  – натуральне значення фактора;  $X_0$  – центральний рівень;  $\Delta X_i$  – інтервал варіювання.

Для підвищення точності математичної моделі та забезпечення можливості параметричної оптимізації процесу термосилової обробки було використано розширений план експерименту. Окрім основного повнофакторного плану типу  $2^3$ , до матриці досліджень були введені центральні та осьові точки. Матриця повнофакторного експерименту типу  $2^3$  наведена у таблиці 2.9.

Загальна модель другого порядку має вигляд:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2$$

де  $y$  – одна із функцій  $R_{24}$  і  $R_{28}$ ;

$b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{13}, b_{23}, \dots, b_{33}$  – коефіцієнти регресії.

**Розширена матриця планування експерименту та результати досліджень**

№ досліду	X1	X2	X3	R24, МПа	R28, МПа
1	-1	-1	-1	31,2	52,4
2	+1	-1	-1	34,1	55,8
3	-1	+1	-1	35,6	57,2
4	+1	+1	-1	38,7	60,4
5	-1	-1	+1	39,8	60,8
6	+1	-1	+1	42,7	63,7
7	-1	+1	+1	43,5	64,1
8	+1	+1	+1	45,2	65,8
9	0	0	0	42,1	63,3
10	0	0	0	42,4	63,6
11	0	0	0	42,0	63,1
12	0	0	0	38,9	59,5
13	-1	0	0	43,2	64,5
14	+1	0	0	39,7	60,2
15	0	-1	0	44,1	65,1
16	0	+1	0	40,2	61,4
17	0	0	-1	44,7	65,3
18	0	0	+1	42,3	63,5

*Джерело: сформовано автором*

Отримані результати показують, що найбільший вплив на ранню міцність бетону мають температура прогрівання та тривалість теплової обробки.

Додаткові центральні та осьові точки дозволили підвищити точність математичної моделі, оцінити адекватність рівнянь регресії та дослідити поведінку системи поблизу оптимальної області параметрів.

Збільшення температури до 70°C та тривалості прогрівання до 6 годин забезпечує інтенсивний набір ранньої міцності бетону.

У результаті статистичної обробки експериментальних даних отримано рівняння регресії для визначення міцності бетону через 24 години:

$$R_{24} = 42,1 + 3,2X_1 + 2,4X_2 + 2,8X_3 + 1,1X_1X_2 + 0,9X_1X_3 + 0,7X_2X_3 - 2,3X_1^2 - 1,8X_2^2 - 1,5X_3^2 \quad (2.3)$$

де  $R_{24}$  – міцність бетону через 24 години, МПа;  $X_1$  – температура прогріву бетонної суміші;  $X_2$  – величина зовнішнього тиску;  $X_3$  – тривалість теплової обробки.

Аналіз коефіцієнтів рівняння показує, що найбільший вплив на ранню міцність має тривалість прогріву та температура обробки.

Для прогнозування кінцевої міцності через 28 діб отримано рівняння:

$$R_{28} = 63,4 + 4,1X_1 + 3,2X_2 + 3,6X_3 + 1,5X_1X_2 + 1,2X_1X_3 + 0,9X_2X_3 - 2,8X_1^2 - 1,8X_2^2 - 1,5X_3^2 \quad (2.4)$$

де  $R_{28}$  – міцність бетону через 28 діб, МПа;  $X_1$  – температура прогріву бетонної суміші;  $X_2$  – величина зовнішнього тиску;  $X_3$  – тривалість теплової обробки.

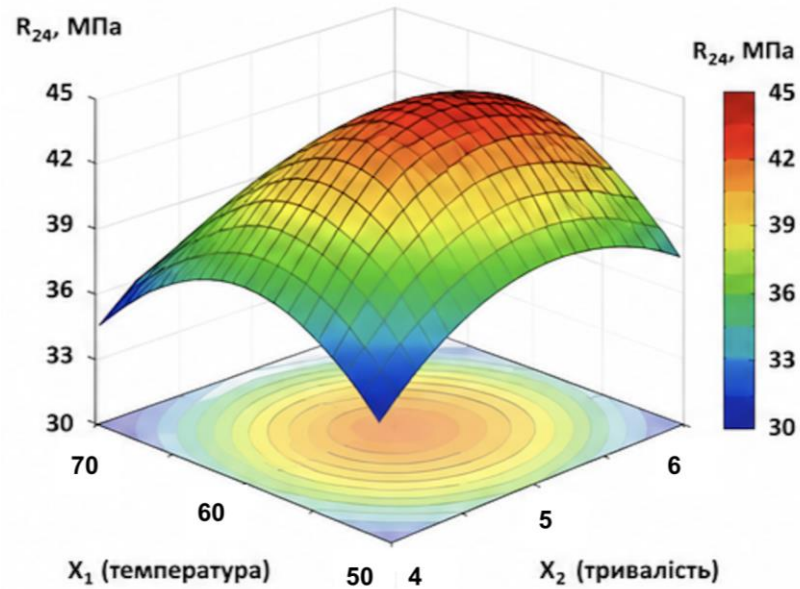


Рисунок 2.5 – Поверхні відгуків та їх двомірні перерізи залежності значень величини міцності в площинах параметрів оптимізації  $R_{24}$

*Джерело: сформовано автором*

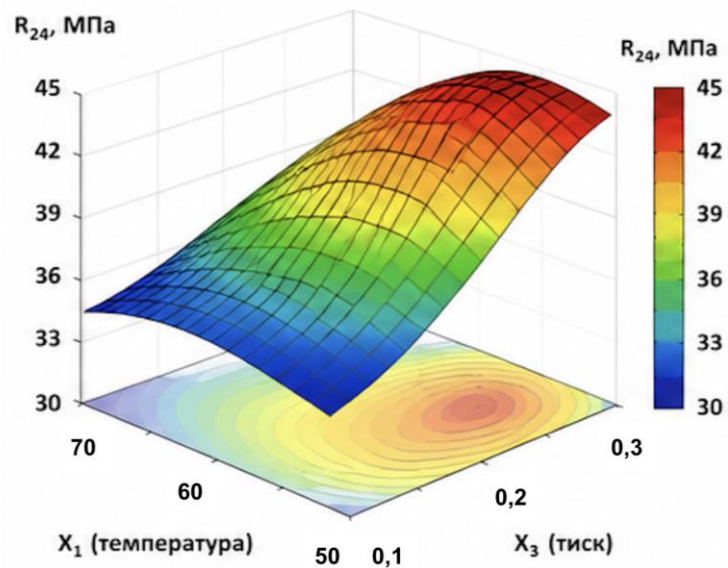


Рисунок 2.6 – Поверхні відгуків та їх двомірні перерізи залежності значень величини міцності в площинах параметрів оптимізації  $R_{24}$

*Джерело: сформовано автором*

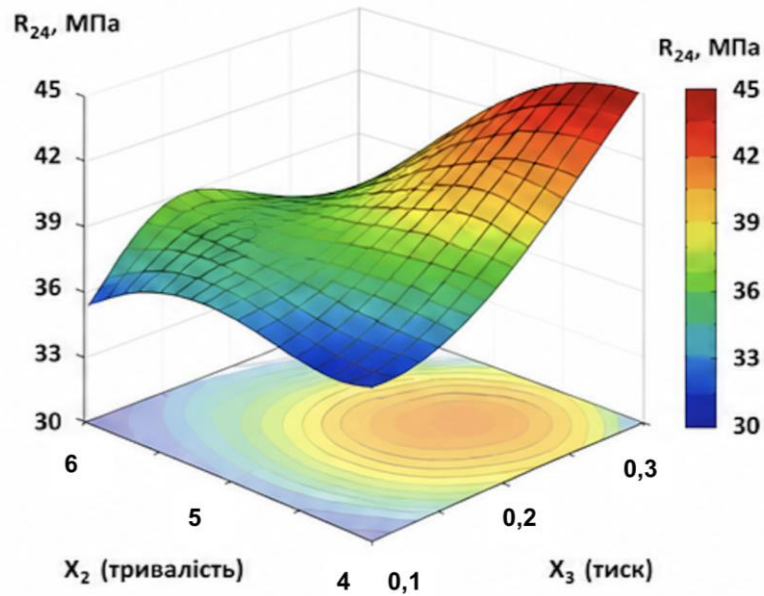


Рисунок 2.7 – Поверхні відгуків та їх двомірні перерізи залежності значень величини міцності в площинах параметрів оптимізації  $R_{24}$

*Джерело: сформовано автором*

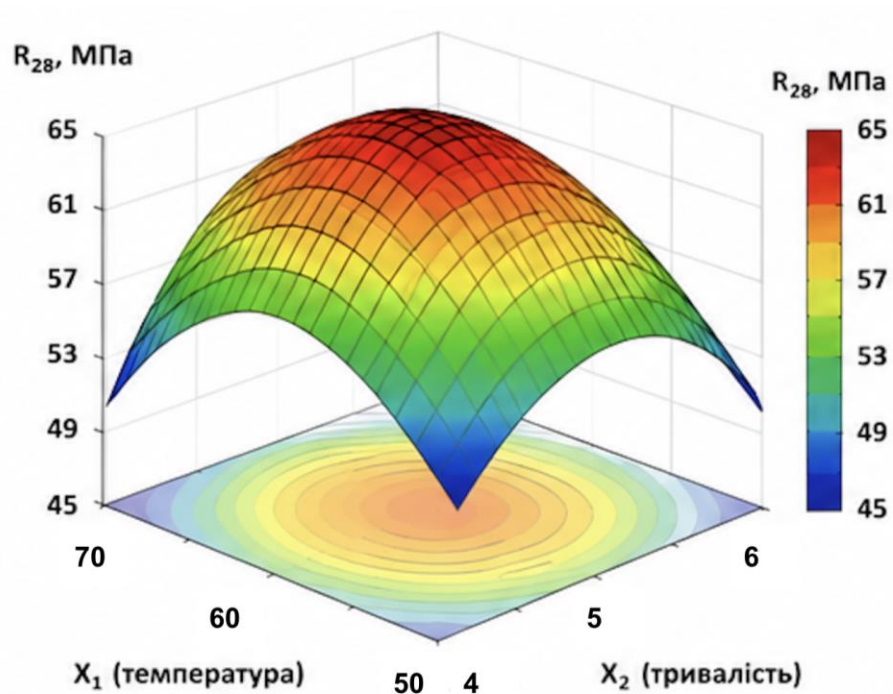


Рисунок 2.8 – Поверхні відгуків та їх двомірні перерізи залежності значень величини міцності в площинах параметрів оптимізації  $R_{28}$

*Джерело: сформовано автором*

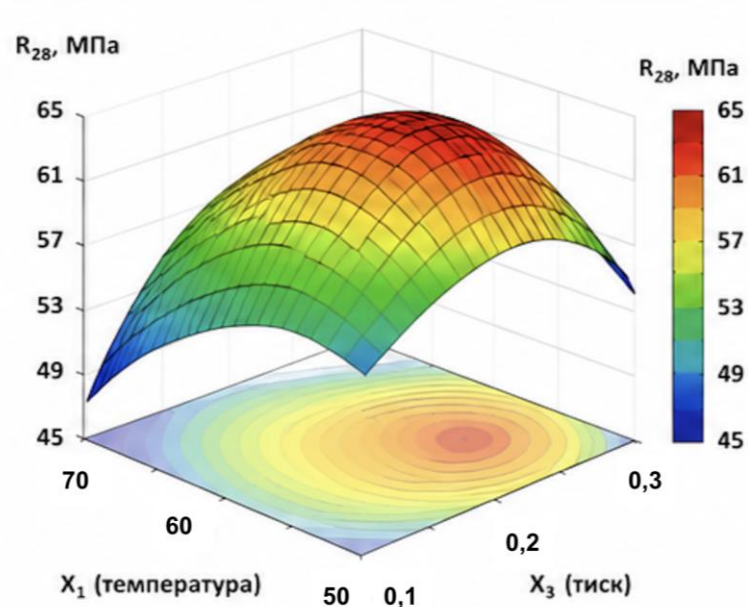


Рисунок 2.9 – Поверхні відгуків та їх двомірні перерізи залежності значень величини міцності в площинах параметрів оптимізації  $R_{28}$

*Джерело: сформовано автором*

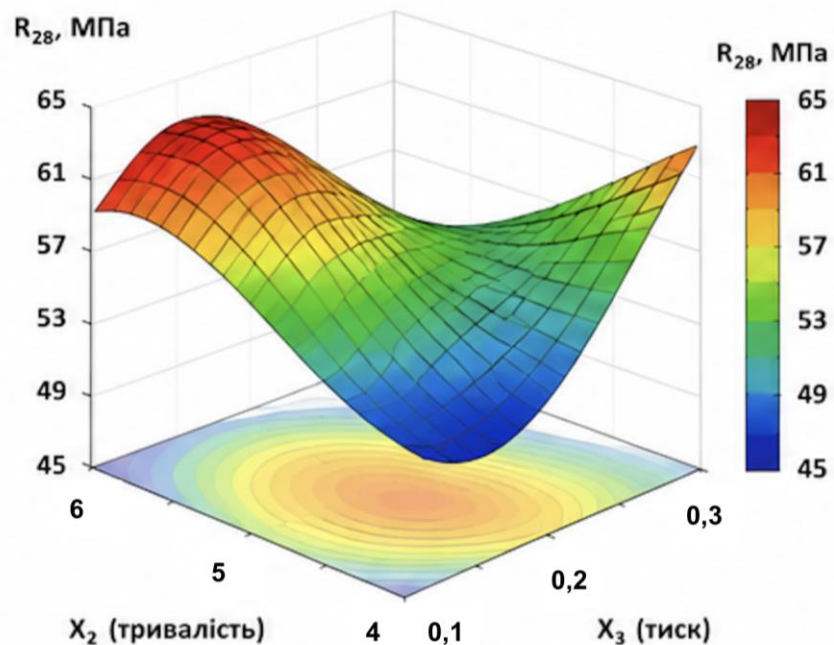


Рисунок 2.10 – Поверхні відгуків та їх двомірні перерізи залежності значень величини міцності в площинах параметрів оптимізації  $R_{28}$

*Джерело: сформовано автором*

## Адекватність регресійних моделей за критерієм Фішера

Показник	Позначення	Значення
Кількість дослідів	N	18
Кількість коефіцієнтів регресії	1	10
Кількість повторних дослідів	m	3
Сума квадратів відхилень	$\sum (\hat{y}_i - y_i)^2$	1,92
Дисперсія адекватності	$S^2_{ad}$	0,72
Дисперсія відтворюваності	$S^2_y$	0,46
Розрахункове значення критерію Фішера	F <sub>розр</sub>	1,57
Ступінь свободи	f1	8
Ступінь свободи	f2	36
Табличне значення критерію Фішера	F <sub>табл</sub>	2,42
Умова адекватності	F <sub>розр</sub> = 1.57 < F <sub>табл</sub> = 2.42	
Висновок	Модель адекватна	

*Джерело: сформовано автором*

Детальний розрахунок адекватності регресійних моделей за критерієм Фішера наведений в Додатку Г.

Оскільки розрахункове значення критерію Фішера менше за табличне, отримана регресійна модель є адекватною та з достатньою точністю описує процес термосилової обробки високоміцних бетонів. Модель може бути використана для прогнозування фізико-механічних характеристик бетонів залежно від параметрів температурного та силового впливу.

На основі отриманих рівнянь регресії проведено параметричну оптимізацію процесу термосилової обробки.

Установлено, що оптимальними параметрами є:

*Таблиця 2.11*

**Оптимальні параметри термосилової обробки**

Параметр	Оптимальне значення
Температура прогріву	68–70°C
Тиск привантаження	0,25–0,30 МПа
Тривалість прогріву	5,5–6 год
Міцність через 24 год	43–45 МПа
Міцність через 28 діб	62–65 МПа

*Джерело: сформовано автором*

## 2.6 Висновки до розділу 2

У другому розділі дисертаційної роботи розглянуто методіку моделювання термосилової технології обробки високоміцних бетонів, обґрунтовано конструктивні та технологічні особливості пакетної термосилової установки, а також виконано підбір складу бетонної суміші для отримання бетонів класу В50–В55.

Проведений аналіз існуючих вібротермосилових установок показав, що основними недоліками традиційних систем є значні енерговитрати та тривалість процесу ущільнення, що зумовлені використанням інтенсивного вібраційного впливу. У зв'язку з цим запропоновано вдосконалену пакетну термосилову установку, в якій виключено використання вібраційних пружин, модернізовано систему термоблоків та впроваджено динамометричний контроль тиску. Це дозволило зменшити теплові втрати, підвищити

рівномірність температурного поля та забезпечити можливість інтеграції сонячного колектора в систему тепlopостачання.

У роботі встановлено, що використання сонячної енергії у процесах термосилової обробки забезпечує стабільний температурний режим у межах 45–65°C, сприяє зниженню капілярної пористості та підвищенню щільності цементного каменю. Показано, що застосування термосилової технології з використанням сонячного тепlopостачання дозволяє досягати 70–80 % проєктної міцності бетону вже через 24 години тверднення за знижених енерговитратах.

На основі аналізу фізико–механічних характеристик матеріалів та літературних джерел обґрунтовано склад високоміцного бетону із співвідношенням компонентів:  $C:P:Ш:V/C = 1:1,24:2,2:0,33$ ; при водоцементному співвідношенні:  $V/C = 0,33$

Застосування такого складу забезпечує формування щільної структури бетону та інтенсивний набір ранньої міцності.

У результаті планування багатофакторного експерименту та параметричної оптимізації встановлено раціональні режими термосилової обробки бетонів. Визначено, що найбільший вплив на міцність мають температура прогрівання та тривалість теплової обробки. Оптимальними параметрами процесу є: температура прогріву 68–70°C; тиск привантаження 0,25–0,30 МПа; тривалість прогріву 5,5–6 год.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої термосилової технології та доцільність її використання для виготовлення бетонних виробів транспортної інфраструктури, зокрема Кассельських бордюрів.

## РОЗДІЛ 3

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРМОСИЛОВОЇ ОБРОБКИ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

#### 3.1 Моделювання термосилової обробки високоміцних бетонів

Для об'єктивного порівняння ефективності в рамках даного дисертаційного дослідження розроблено чотири пакетні термосилові установки, що використовують різні джерела теплоти та схеми енергообміну, і застосовано методи математичної статистики. Це дозволило встановити достовірні відмінності між установками, оцінити вплив температури, тривалості ізотермічної витримки та тиску на приріст міцності бетону, а також сформулювати математичні моделі процесу тверднення.

Моделюванню та аналізу підлягали результати, отримані для таких установок:

1. Пакетна термосилова установка з застосуванням сонячної енергії
2. Пакетна термосилова установка з комбінованою геліосистемою
3. Пакетна термосилова установка з енергетичним комплексом
4. Пакетна термосилова установка з термосом (ізольована теплова камера)

Експериментальні дослідження проводилися у програмному середовищі COMSOL Multiphysics (навчальна версія Class Kit License), де було промодельовано та проаналізовано чотири варіанти термосилових установок для теплової обробки бетону. Для кожної моделі задавалися однакові умови навантаження, температурні режими та теплотехнічні параметри, що дозволило коректно порівняти їх ефективність.

За допомогою COMSOL (навчальна версія Class Kit License) виконано мультифізичне моделювання, яке включало теплопровідність, теплове випромінювання, теплове розширення та вплив тиску на бетонну суміш. Це

дало змогу оцінити динаміку прогрівання бетону, швидкість набору міцності, рівномірність теплових полів та ефективність роботи кожної установки.

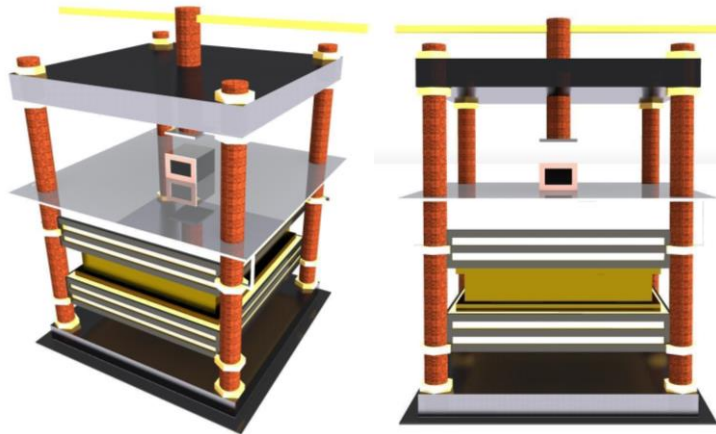


Рисунок 3.1 – Модель пакетної термосилової установки (ArchiCAD Graphisoft education license)

*Джерело: сформовано автором*

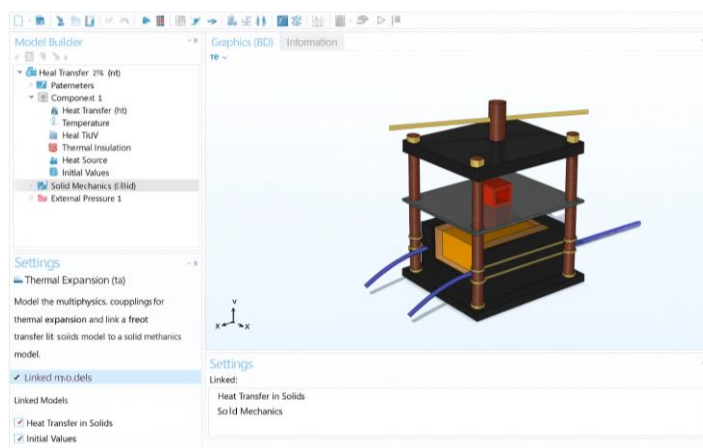


Рисунок 3.2 – Моделювання пакетної термосилової установки в COMSOL (навчальна версія Class Kit License)

*Джерело: сформовано автором*

У моделі використано вакуумний сонячний колектор SC-LH3-30, який належить до трубчастих сонячних теплових колекторів із високим ступенем теплоізоляції завдяки вакуумному простору між скляними трубками. Конструкція призначена для ефективного перетворення сонячної радіації в теплову енергію з мінімальними тепловими втратами, особливо при низьких температурах навколишнього середовища.

У дисертаційному моделюванні SC–LH3–30 виступає як тепловий граничний елемент системи сонячного теплопостачання, що забезпечує:



Рисунок 3.3 – Вакуумний сонячний колектор SC–LH3–30 для моделювання

*Джерело: сформовано автором*

*Таблиця 3.1*

**Основні технічні характеристики SC–LH3–30 (клас LH3–30)**

№	Характеристика	Показник
1	Тип	вакуумний трубчастий сонячний колектор
2	Кількість трубок	30 шт.
3	Конструкція трубки	«heat pipe» або прямотечійний U–type (залежно від модифікації)
4	Матеріал трубок	боросилікатне скло
5	Вакуумний прошарок	високий вакуум для зменшення конвективних і кондуктивних втрат
6	Поглинаюче покриття	селективне (високий коефіцієнт поглинання, низька емісія)
7	Ефективна площа поглинання	орієнтовно 2,5–3,5 м <sup>2</sup>
8	ККД (оптичний)	~0,65–0,80
9	Робочий теплоносій	вода або водно–гліколева суміш
10	Робоча температура	+60 – +80 °C

*Джерело: сформовано автором*

### 3.2 Пакетна термосилова установка з застосуванням сонячної енергії

Першою розробленою моделлю була пакетна термосилова установка із застосуванням сонячної енергії

В установці до термоблоків за допомогою гнучких штанг та повітропроводу приєднані теплоприймач сонячної енергії, повітрянагрівач та вентилятор (рис. 2.10).

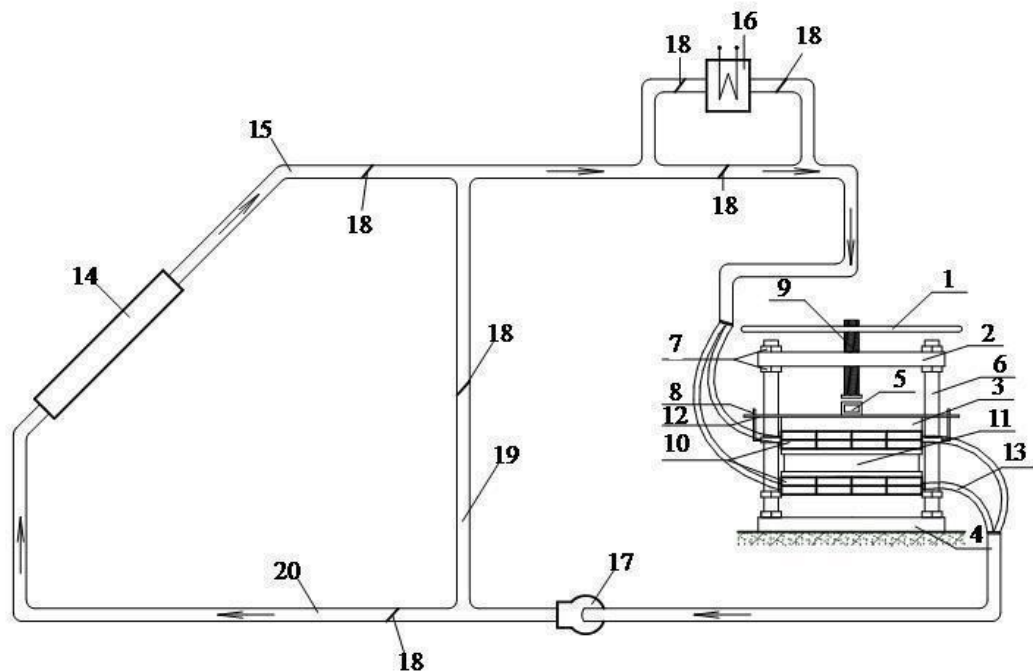


Рисунок 3.4 – Пакетна термосилова установка з застосуванням сонячної енергії [126]

Установка складається з основи 4, на якій встановлені направляючі колонки 6, що закріплені за допомогою гайок 7. У центрі верхньої плити 2 зроблений отвір з різьбою для закріплення та переміщення пресувального обладнання, яке складається з важеля 1 та штока 9. Шток 9 з'єднаний з рухомою плитою 3 і служить для розподілення тиску на всю поверхню термоблока 10, до якого приєднані гнучкі штанги 13. Між термоблоками розташована прес-форма 11. Арматура 8 та 12 з'єднана з рухомою плитою 3.

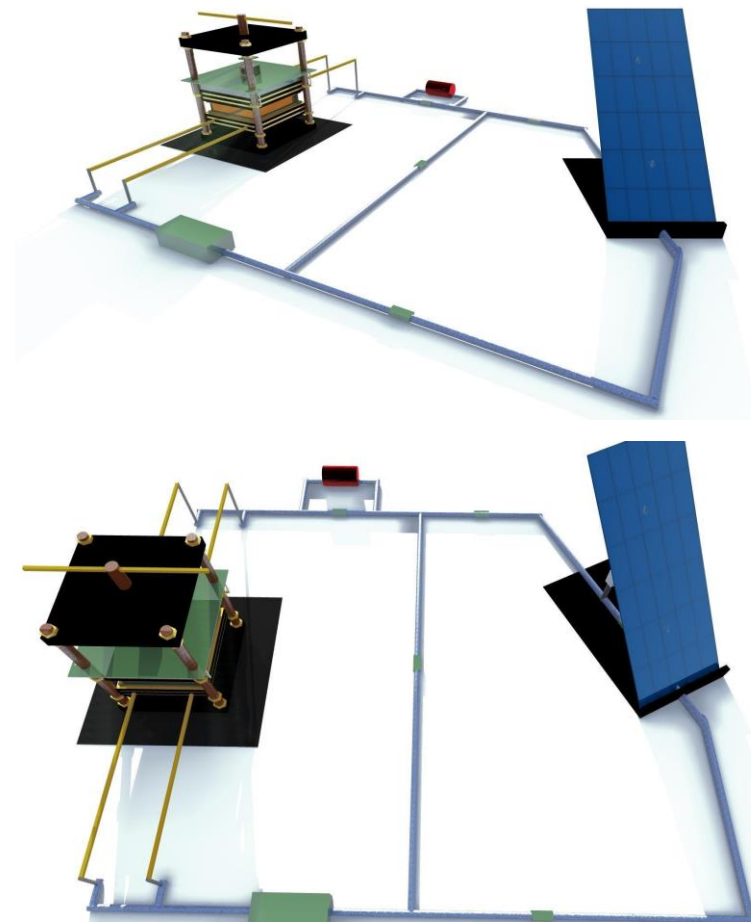


Рисунок 3.5 – Пакетна термосилова установка з застосуванням сонячної енергії (модель)

*Джерело: сформовано автором*

За допомогою гнучких штанг 13 установка з'єднана з повітропроводом 15 та 20, до яких приєднані сонячний теплоприймач 14, повітронагрівач 16, вентилятор 17, по трубопроводу встановлені заслінки 18 та встановлений, перпендикулярно повітропроводам 15 і 20, який з'єднує їх, додатковий повітропровід 19.

Установка працює таким чином – у прес-форму 11 заливається бетонна суміш, після чого вона розміщується між термоблоками 10. За допомогою важеля 1 встановлюється привантаження, вмикаються термоблоки 10. Процес нагрівання проходить в замкненому просторі, тому термоблок 10 одночасно гріє та пресує суміш.

Нагрівання термоблоків відбувається наступним чином повітря, яке циркулює в системі, нагрівається за допомогою сонячного теплоприймача 14. Нагріте повітря рухається по верхньому повітропроводу 15 до термосилової установки, у якій розташована форма з бетонною сумішшю 11, де віддає певну кількість теплоти термоблокам 10. Далі повітря по нижньому повітропроводу 20 спрямовується до сонячного теплоприймача 14. За необхідності використовується додаткове джерело теплоти повітрянагрівач 16. Рух повітря в системі обумовлюється дією вентилятора 17. Для регулювання напрямку потоку повітря використовуються заслінки 18 [122].

Якщо інтенсивність потоку сонячної енергії в певний період буде незначною, то в цей інтервал часу доцільно нагрівати повітря тільки в резервному джерелі теплоти 16. У цьому випадку рух повітря здійснюється через ділянку 19, а не через сонячний теплоприймач.

Після закінчення циклу термосилової обробки установку вимикають і дають змогу бетону плавно охолонути та вийти з під тиску не руйнуючись.

Таким чином, бетон одночасно пресується і нагрівається в замкненому просторі термоблоків, що дозволяє збільшити щільність і міцність за рахунок термосилової дії.

Розрахункова формула для пакетної термосилової установки у вигляді енергетичного балансу з урахуванням особливості системи:

$$Q = \eta s A I t - Q_{вт}, \quad (3.1)$$

де:  $\eta s$  – ККД геліосистеми;  $A$  – площа поглинання сонячної енергії;  $I$  – інтенсивність сонячної радіації;  $t$  – час обробки;  $Q_{вт}$  – тепловтрати системи.

Для забезпечення максимального надходження сонячної енергії в колектор встановлюють у похилому положенні з оптимальним кутом. Коефіцієнт перерахунку кількості енергії з горизонтальної поверхні на похилу поверхню геліотехнічного пристрою південної орієнтації дорівнює сумі трьох складових, що відповідають прямому, розсіяному та відбитому випромінюванню [6].

Тепловий вплив на тверднення бетону в енергетичній установці, як правило, здійснюється при температурі 70–95 ° С. У цьому діапазоні температур відбувається прямий нагрів предметів сонячною радіацією. У перетворювачах і акумуляторах сонячної енергії можна досягати температуру 100 ° С і вище.

Доступність отримання низькотемпературного тепла у вигляді гарячого повітря, води та інших рідких теплоаккумулюючих композицій дозволяє розглянути альтернативні схеми термосилових установок.

### 3.3 Пакетна термосилова установка з комбінованою геліосистемою

Установка складається з основи 4, на якій встановлені направляючі колонки 6, що закріплені за допомогою гайок 7. У центрі верхньої плити 2 зроблений отвір з різьбою для закріплення та переміщення пресувального обладнання, яке складається з важеля 1 та штока 9. Шток 9 з'єднаний з рухомою плитою 3 і служить для розподілення тиску, датчик тиску 5 показує величину тиску, що передається на всю поверхню термоблоків 10, до яких приєднані гнучкі штанги 13. Між термоблоками розташована прес-форма 11. Арматура 8 та 12 з'єднана з рухомою плитою 3.

За допомогою гнучких штанг 13, установка з'єднана з трубопроводом 16, до якого приєднаний геліоколектор 18, теплогенератор з ТЕНом 17, насос 14 і бак-акумулятор 19, на трубопроводі встановлені крани 15.

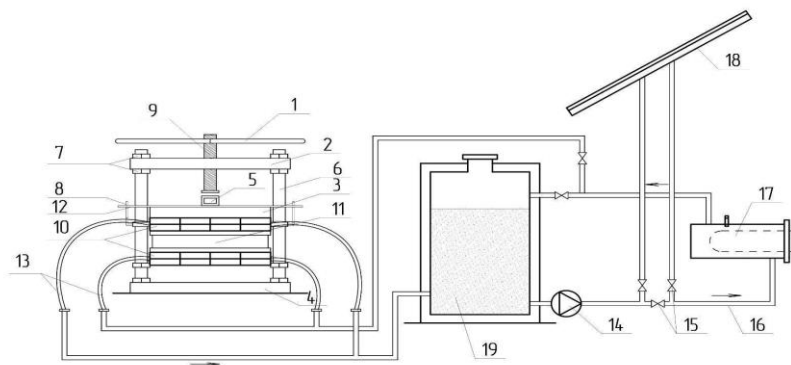


Рисунок 3.6 – Пакетна термосилова установка з комбінованою геліосистемою

Установка працює таким чином: у прес-форму 11 заливається бетонна суміш і поміщається між термоблоками 10, за допомогою важеля 1 встановлюється привантаження, через отвір верхньої плити 2 проходить шток 9 і привантажує термоблоки 10 за допомогою рухомої плити 3, яку тримає арматура 8 і 12, опорами слугують направляючі колонки 6 та основа 4, які закріплені за допомогою гайок 7, вмикаються термоблоки 10. Датчик тиску 5 показує силу привантаження. Процес нагрівання відбувається у замкненому просторі, тому термоблоки 10 одночасно забезпечують нагрівання та пресування суміші.

Нагрівання термоблоків відбувається таким чином вода, що циркулює в системі, нагрівається за допомогою геліоколектора 18. Нагріта вода рухається за допомогою насоса 14 до бак-акумулятора 19, звідки надходить попадає до термосилової установки, по гнучких штангах 13. У встановленій прес-формі з бетонною сумішшю 11 вона віддає певну кількість теплоти термоблокам 10. Далі вода по трубопроводу 16 спрямовується до геліоколектора 18. За необхідності використовується додаткове джерело теплоти теплогенератор з ТЕНОм 17. Рух води в системі забезпечується насосом 14. Для регулювання напрямку та перекриття потоку води використовуються крани 15 [127].

Після закінчення циклу термосилової обробки установку вимикають і забезпечують поступове охолодження бетону та зняття тиску без руйнування його структури.

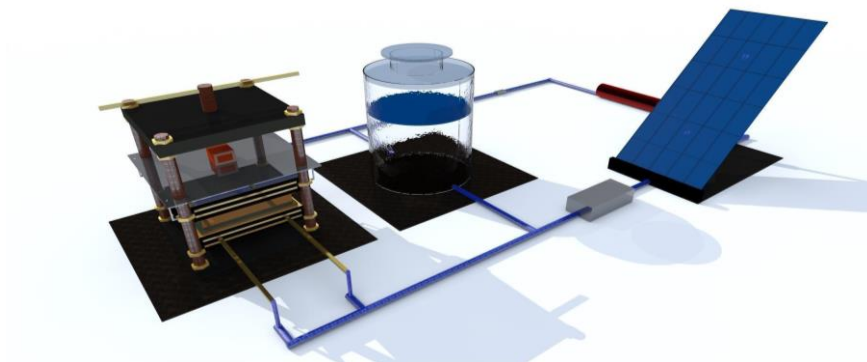


Рисунок 3.7 – Пакетна термосилова установка з комбінованою геліосистемою (3Д – модель)

*Джерело: сформовано автором*

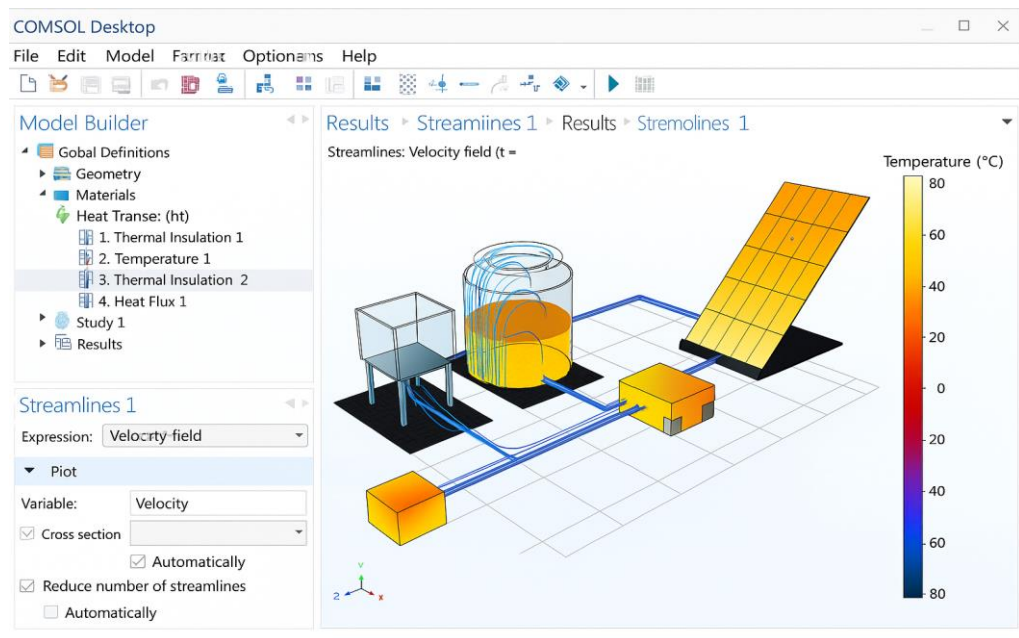


Рисунок 3.8 – Моделювання термосилова установка з комбінованою геліосистемою в COMSOL (навчальна версія Class Kit License)

*Джерело: сформовано автором*

Розрахункова формула для пакетної термосилової установки у вигляді енергетичного балансу з урахуванням особливості системи:

$$Q_{comb} = \eta_s A_s I t + \eta_e P_e t - Q_{вт} \quad (3.2)$$

де:  $\eta_s A_s I t$  – сонячна складова процесу,  $\eta_e P_e t$  – додаткова енергетична складова (електронагрів),  $P_e$  – потужність резервного джерела,  $Q_{вт}$  – тепловтрати

### 3.4 Пакетна термосилова установка з енергетичним комплексом

Установка складається з основи 4, на якій встановлені направляючі колонки 6, що закріплені за допомогою гайок 7. У центрі верхньої плити 2 зроблений отвір з різьбою для закріплення та переміщення пресувального обладнання, яке складається з важеля 1 та штока 9. Шток 9 з'єднаний з рухомою плитою 3 і служить для розподілення тиску. Датчик тиску 5 показує величину тиску, що передається на всю поверхню термоблоків 10. Між

термоблоками розташована прес-форма 11. Арматура 8 та 12 з'єднана з рухомою плитою 3.

За допомогою трубопроводу 18, установка з'єднана з енергетичним комплексом, до якого входять сонячний теплоприймач 13, акумулятор теплоти 16, насос 14 і геліоколектора 17, на трубопроводі встановлені крани 15.

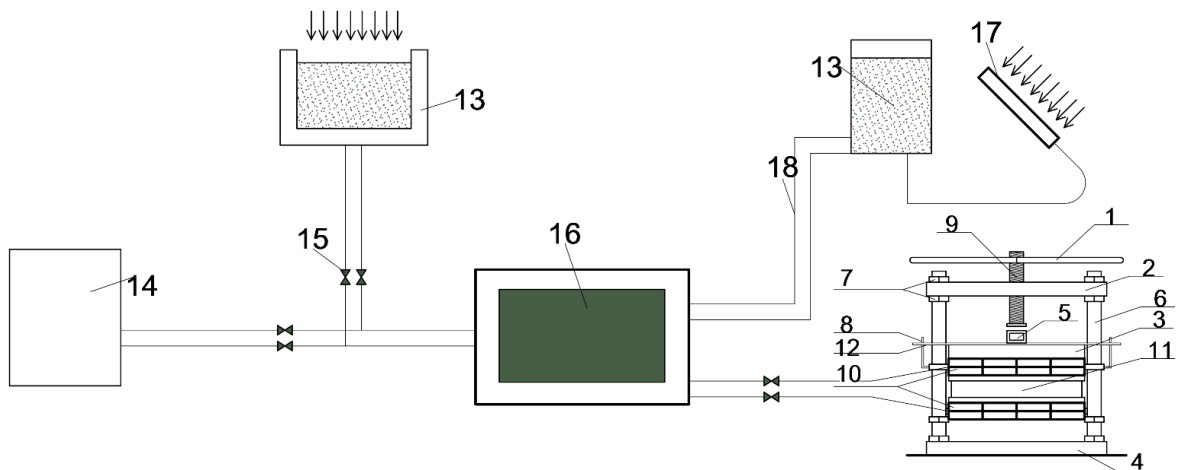


Рисунок 3.9 – Пакетна термосилова установка з енергетичним комплексом

[124]

Установка працює наступним чином: у прес-форму 11 заливається бетонна суміш і поміщається між термоблоками 10. За допомогою важеля 1 встановлюється привантаження, через отвір верхньої плити 2 проходить шток 9 і привантажує термоблоки 10 за допомогою рухомої плити 3, яку тримає арматура 8 і 12, а опорами слугують направляючі колонки 6 та основа 4, що закріплені за допомогою гайок 7. Після цього вмикаються термоблоки 10. Датчик тиску 5 показує силу привантаження. Процес нагрівання відбувається у замкненому просторі, тому термоблоки 10 одночасно гріють та пресують суміш.

Нагрівання термоблоків відбувається таким чином: вода, що циркулює в енергетичному комплексі, нагрівається за допомогою геліоколектора 17.

Нагріта вода рухається за допомогою насоса 14, від геліоколектора 17 і теплоприймачів 13 до термоблоків 10, де розташована прес-форма 11 з бетонною сумішшю, яка сприймає певну кількість теплоти від термоблоків 10. Теплоприймачі 13 додатково сприймають енергію та нагрівають воду в трупопроводі 18, що у свою чергу, сприяє нагріванню прес-форми з бетонною сумішшю 11. Для регулювання напрямку та перекриття потоку води використовуються крани 15. Акумулятор теплоти 16 тримає тепло та віддає його в період недостатньої роботи геліоколектора 17 [124].

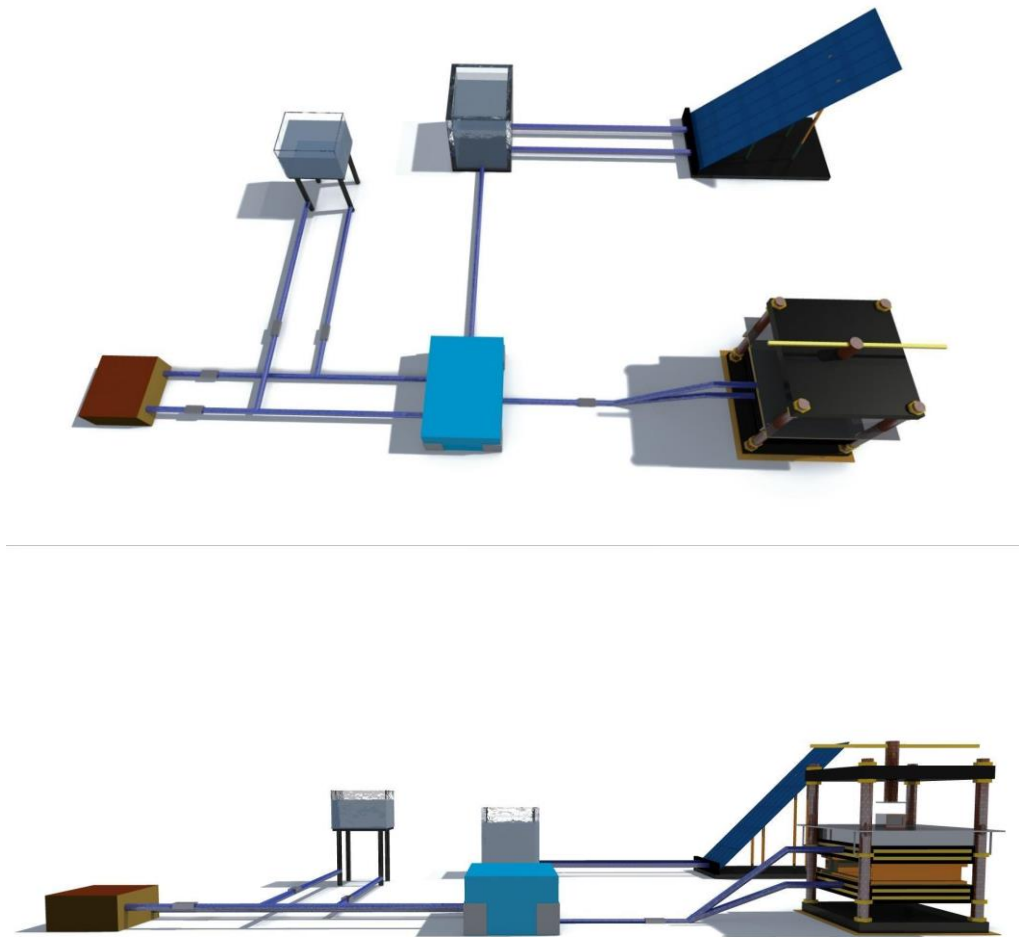


Рисунок 3.10 – Пакетна термосилова установка з енергетичним комплексом (3Д – модель)

*Джерело: сформовано автором*

Розрахункова формула для пакетної термосилової установки у вигляді

енергетичного балансу з урахуванням особливості системи:

$$Q_{ec} = (P_{th} + P_{el} + P_{alt})t - Q_{вт}(3.3)$$

де:  $P_{th}$  – теплова потужність (пара, гаряча вода),  $P_{el}$  – електрична складова,  $P_{alt}$  – альтернативні джерела (сонце, вторинне тепло),  $t$  – час циклу

### 3.5 Пакетна термосилова установка з термосом

Установка складається з основи 4, на якій встановлені направляючі колонки 6, що закріплені за допомогою гайок 7. У центрі верхньої плити 2 зроблений отвір з різьбою для закріплення та переміщення пресувального обладнання, яке складається з важеля 1 та штока 9. Шток 9 з'єднаний з рухомою плитою 3, датчик тиску 5 показує величину тиску, що передається на всю поверхню термоблоків 10, до яких приєднані гнучкі штанги 13. Між термоблоками розташована прес-форма 11. Арматура 8 та 12 з'єднана з рухомою плитою 3.

За допомогою гнучких штанг 13 установка з'єднана з трубопроводом 16, до якого приєднані геліоколектор 18, теплогенератор з ТЕНОм 17, насос 14 і термос 19, по трубопроводу встановлені крани 15.

Установка працює таким чином: у прес-форму 11 заливається бетонна суміш і поміщається між термоблоками 10, за допомогою важеля 1 встановлюється привантаження, вмикаються термоблоки 10. Процес нагрівання відбувається в замкненому просторі, тому термоблок 10 одночасно гріє та пресує суміш. Термос 19 зберігає потрібну температуру.

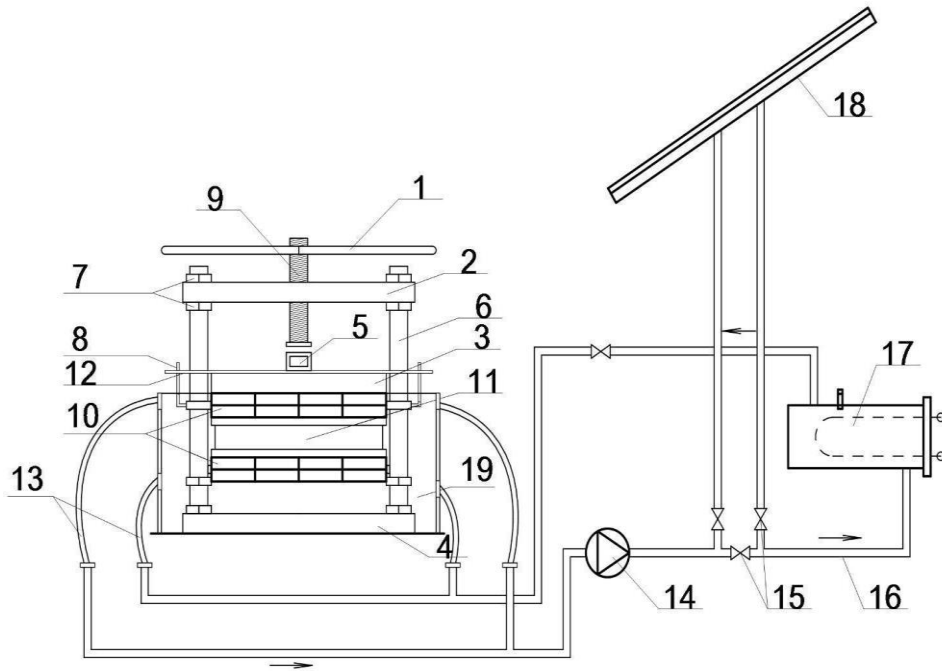


Рисунок 3.11 – Пакетна термосилова установка з термосом [125]

Нагрівання термоблоків відбувається таким чином: вода що циркулює в системі, нагрівається за допомогою геліоколектора 18. Нагріта вода рухається за допомогою насоса 14 до бак-акумулятора, звідки надходить, до термосилової установки, у якій розташована форма з бетонною сумішшю 11, де віддає частину теплоти термоблокам 10. Далі вода по трубопроводу 16 спрямовується до геліоколектора 18. За необхідності використовується додаткове джерело теплоти теплогенератор з ТЕНом 17. Рух повітря в системі зумовлюється дією насоса 14. Для регулювання напрямку та перекриття потоку води використовуються крани 15 [128].

Після завершення циклу термосилової обробки установку вимикають і забезпечують поступове охолодження та зняття тиску без руйнування його структури.

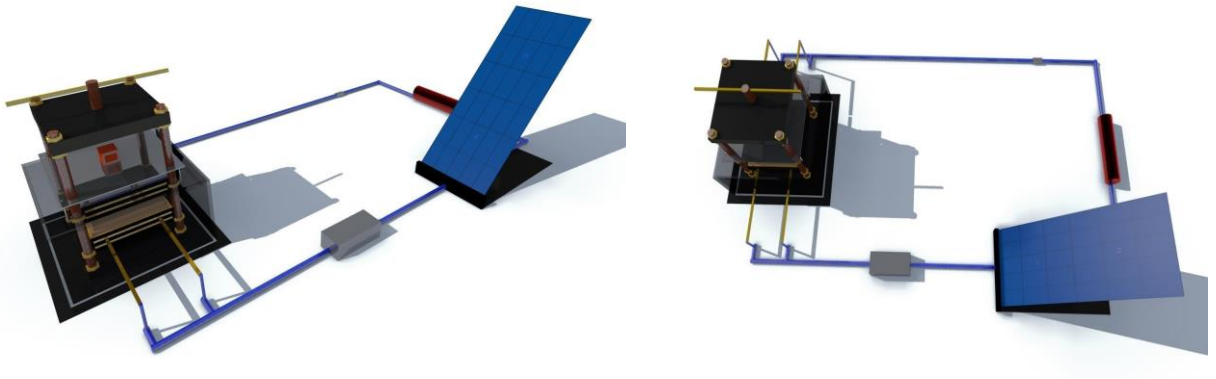


Рисунок 3.12 – Пакетна термосилова установка з термосом (3Д – модель)

*Джерело: сформовано автором*

Розрахункова формула для пакетної термосилової установки у вигляді енергетичного балансу з урахуванням особливості системи:

$$Q_{\text{thermos}} = mbc_b(T_0 - T_{\text{env}}) - kA\Delta T t \quad (3.4)$$

де:  $mbc_b(T_0 - T_{\text{env}})$  – акумульоване тепло бетонної маси,  $kA\Delta T t$  – втрати через теплоізоляцію,  $k$  – коефіцієнт теплопередачі оболонки,  $A$  – площа поверхні камери.

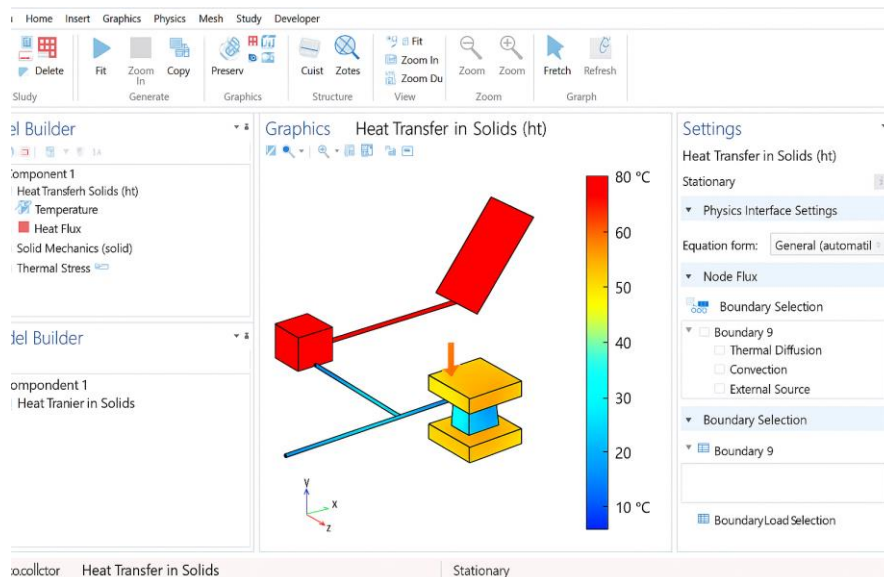


Рисунок 3.13 – Моделювання пакетної термосилової установки з термосом (навчальна версія Class Kit License)

*Джерело: сформовано автором*

### 3.6 Аналіз результатів моделювання

Нагрівання бетонного зразка в пакетній термосиловій установці з використанням сонячної енергії відбувається нерівномірно та значною мірою залежить від інтенсивності сонячної радіації. Спостерігається циклічний характер теплового впливу: максимальна температура досягається лише у денні години, тоді як у нічний період можливе часткове охолодження.

Міцність зростає повільно та поступово стабілізується. Періодичні температурні коливання спричиняють чергування фаз активної гідратації та уповільнення процесу. Це може призводити до меншої рівномірності структури на ранніх етапах тверднення.

Охолодження відбувається природним шляхом і є більш вираженим у нічний період. Виникають циклічні температурні напруження, що можуть впливати на формування мікроструктури цементного каменю.

У пакетній термосиловій установці з комбінованою геліосистемою завдяки поєднанню сонячного нагріву та допоміжної системи забезпечується більш стабільний температурний графік. Коливання температури значно зменшуються, а вихід на робочий режим відбувається швидше.

Процес тверднення є більш рівномірним у порівнянні з простою сонячною установкою. Стабільність температурного поля сприяє інтенсивному розвитку гідратаційних процесів і формуванню більш щільної структури бетону.

Охолодження відбувається контрольовано, без різких перепадів. Зменшення температурних коливань знижує ризик виникнення внутрішніх напружень і мікротріщин.

У пакетній термосиловій установці з енергетичним комплексом забезпечується найбільш стабільне та кероване нагрівання. Використання енергетичного комплексу дозволяє підтримувати задану температуру незалежно від зовнішніх умов, забезпечуючи майже стаціонарний тепловий режим.

Міцність формується інтенсивно та прогнозовано. Стабільність температури і контрольоване нагрівання сприяють активній гідратації цементу, що забезпечує високі показники.

Охолодження є контрольованим і поступовим. Завдяки можливості регулювання зменшуються термічні напруження та підвищується структурна однорідність матеріалу.

У пакетній термосиловій установці з термосом тепловий режим характеризується високою стабільністю за рахунок мінімальних тепловтрат. Після початкового нагріву система переходить у режим повільного теплового спаду, що забезпечується високим рівнем теплоізоляції.

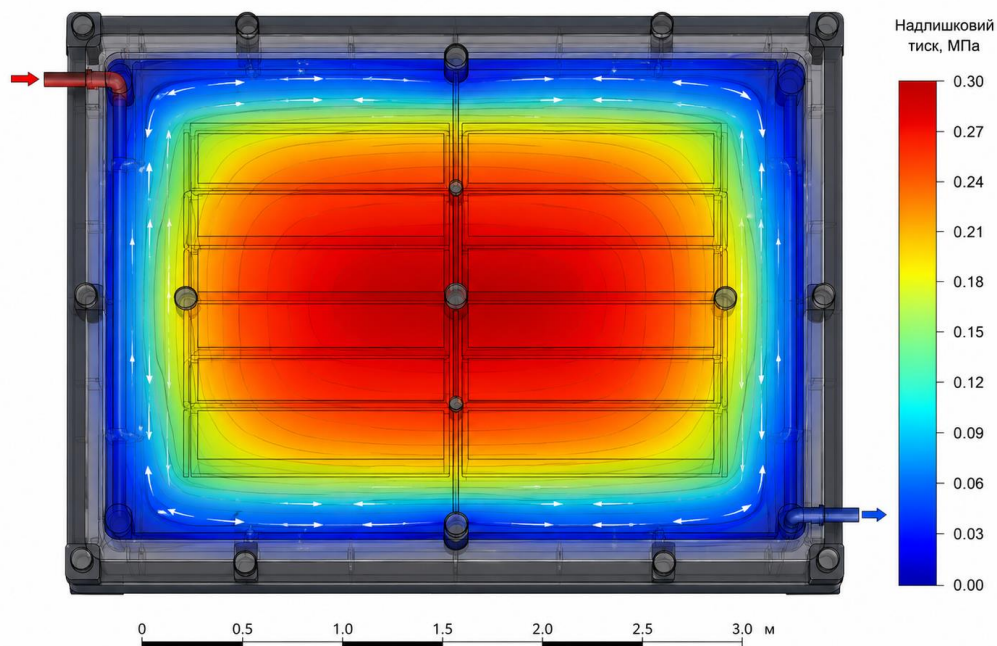


Рисунок 3.14 – Розподіл надлишкового тиску в пакетній термосиловій установці - вигляд зверху (навчальна версія Class Kit License)

*Джерело: сформовано автором*

На рис. 3.14 наведено результати CFD-моделювання розподілу надлишкового тиску в пакетній термосиловій установці у поперечному перерізі (вигляд зверху). Моделювання виконувалося з метою дослідження закономірностей формування поля надлишкового тиску всередині робочої камери установки та оцінювання рівномірності силового впливу на бетонні

вироби під час термосилової обробки.

Аналіз отриманих результатів показує, що максимальні значення надлишкового тиску формуються у центральній частині робочої зони установки та досягають 0,30 МПа.

Розподіл надлишкового тиску має плавний градієнт від центральної області до периферії, що свідчить про достатньо рівномірний характер силового впливу на пакети бетонних виробів.

Отримані результати CFD-моделювання підтверджують ефективність обраної конструктивної схеми пакетної термосилової установки та свідчать про можливість забезпечення рівномірного розподілу силового впливу між окремими шарами бетонних виробів. Це сприяє інтенсифікації процесів ущільнення структури цементного каменю, зменшенню капілярної пористості та підвищенню фізико-механічних характеристик високоміцного бетону.

Міцність зростає рівномірно завдяки тривалому утриманню тепла всередині камери. Такий режим сприяє глибшій гідратації цементу та формуванню щільної структури цементного каменю.

Охолодження є найповільнішим серед усіх розглянутих варіантів. Завдяки термоізоляції забезпечується мінімізація температурних градієнтів, що практично виключає виникнення внутрішніх напружень.

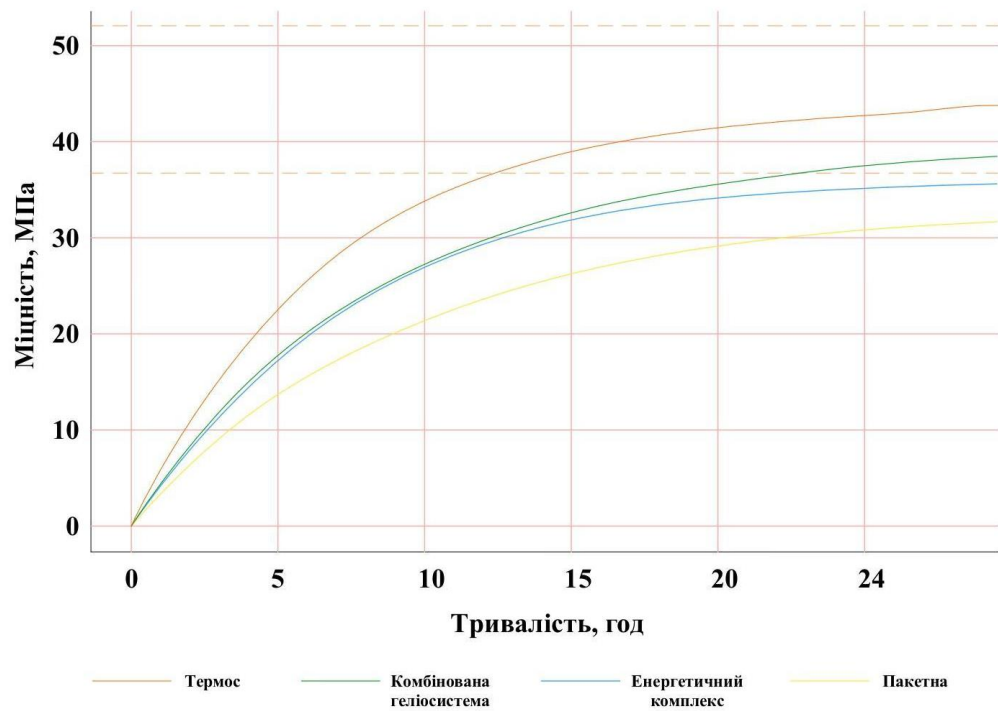


Рисунок 3.15 – Графік набору міцності МПа за 24 години

*Джерело: сформовано автором*

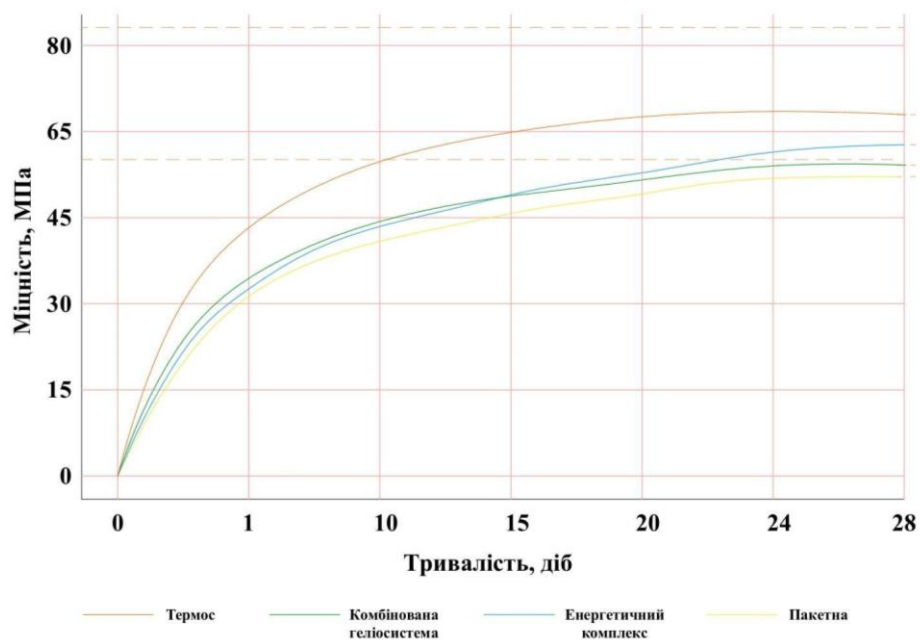


Рисунок 3.16 – Графік набору міцності МПа за 28 днів

*Джерело: сформовано автором*

**Основні показники термосилових установок при моделюванні**

Показник	Сонячна установка	Комбінована геліосистема	Енергетичний комплекс	Термос
Середня температура, °С	45–55	55–65	70–80	60–70
Максимальна температура, °С	60	75	85	72
Час виходу на режим, год	6–7	4–5	3–4	3–4
Тривалість циклу, год	8–9	9–12	8–10	6–8
Міцність через 24 год, МПа	31	36	34	42
Кінцева міцність (28 діб), МПа	51	54	57	68
Потужність, кВт	15	18	22	15
Втрати тепла, %	35	30	20	10

*Джерело: сформовано автором*

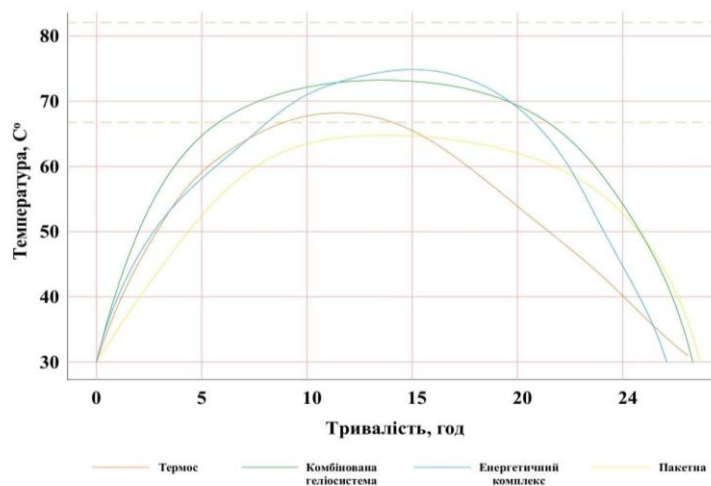


Рисунок 3.17 – Графік прогріву та охолодження бетонних зразків  
*Джерело: сформовано автором*

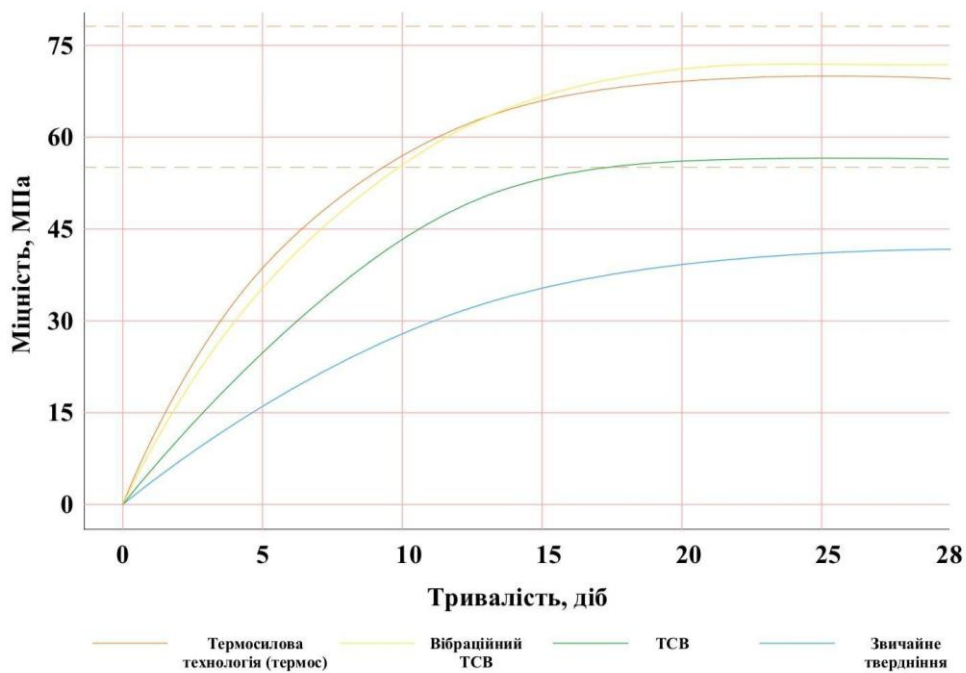


Рисунок 3.18 – Набір міцності за 28 діб  
*Джерело: сформовано автором*

**Вимоги до технологій бетону де використовується термосилова установка  
(термос)**

Фактор	Вимога
Температура	<ul style="list-style-type: none"> <li>- максимальна температура нагрівання бетону близько 70°C;</li> <li>- швидкість зміни температури не більше 20°C/год;</li> <li>- тривалість процесу обробки температурою не менше 6 год;</li> <li>- використання привантаження при нагріванні.</li> </ul>
Тиск	<ul style="list-style-type: none"> <li>- при збільшенні В/Ц – збільшувати швидкість навантаження зразків, і навпаки;</li> <li>- застосування як найменших тисків (0,6–1 МПа)</li> </ul>

*Джерело: сформовано автором*

### 3.7 Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано моделювання процесів термосилової обробки високоміцних бетонів та проведено порівняльний аналіз роботи чотирьох пакетних термосилових установок із різними джерелами теплової енергії. Для дослідження використано програмне середовище COMSOL Multiphysics (навчальна версія Class Kit License), що дозволило виконати мультифізичне моделювання процесів теплопровідності, теплового випромінювання, теплового розширення та механічного впливу тиску на бетонну суміш.

У процесі дослідження змодельовано:

- пакетну термосилову установку з використанням сонячної енергії;
- пакетну термосилову установку з комбінованою геліосистемою;
- пакетну термосилову установку з енергетичним комплексом;
- пакетну термосилову установку з термосом.

Встановлено, що використання вакуумного сонячного колектора SC–LN3–30 забезпечує ефективне перетворення сонячної радіації у теплову

енергію з мінімальними тепловими втратами. Використання вакуумного прошарку та селективного покриття дозволяє досягати робочих температур у межах 60–80 °С, що відповідає оптимальним режимам теплової обробки високоміцних бетонів.

За результатами моделювання встановлено, що пакетна термосилова установка з використанням сонячної енергії характеризується циклічним режимом нагрівання, залежним від інтенсивності сонячної радіації. Незважаючи на найнижчі енерговитрати, дана система має нерівномірний температурний режим і нижчі показники ранньої міцності бетону порівняно з іншими установками.

Дослідження комбінованої геліосистеми показало, що поєднання сонячного нагріву та резервного електричного джерела теплоти дозволяє стабілізувати температурний режим, скоротити час виходу установки на робочий режим і забезпечити більш рівномірне тверднення бетонної суміші. Використання додаткового джерела енергії сприяє зменшенню температурних коливань та підвищенню однорідності структури цементного каменю.

У результаті аналізу пакетної термосилової установки з енергетичним комплексом встановлено, що дана система забезпечує найбільш стабільний та керований режим теплової обробки. Використання акумулятора теплоти, геліоколектора та додаткових джерел енергії дозволяє підтримувати практично стаціонарний температурний режим незалежно від зовнішніх умов. Це забезпечує інтенсивний розвиток гідратаційних процесів і високі показники кінцевої міцності бетону.

Найбільш ефективною за результатами моделювання виявилась пакетна термосилова установка з термосом. Високий рівень теплоізоляції забезпечує мінімальні тепловтрати та найбільш стабільний температурний режим. Повільне охолодження бетонної суміші сприяє рівномірному розвитку процесів гідратації, зменшенню температурних напружень та формуванню щільної структури цементного каменю. Установка забезпечила найвищі показники ранньої та кінцевої міцності бетону при відносно невисоких

енерговитратах.

За результатами порівняльного аналізу встановлено, що:

- максимальні показники кінцевої міцності бетону (68 МПа) отримані в установці з термосом;
- найнижчі тепловтрати (10 %) характерні для термоізованої установки;
- установка з енергетичним комплексом забезпечує найбільш стабільний температурний режим;
- сонячна установка характеризується мінімальними енерговитратами, але залежить від зовнішніх кліматичних умов;
- комбінована геліосистема забезпечує оптимальне співвідношення між енергоефективністю та стабільністю режиму прогріву.

У процесі моделювання підтверджено, що ефективність термосилової обробки визначається не лише максимальною температурою прогріву, а й стабільністю температурного режиму, швидкістю нагріву та охолодження, рівнем тепловтрат і можливістю підтримання привантаження під час тверднення.

На основі проведених досліджень визначено оптимальні технологічні параметри термосилової обробки високоміцних бетонів:

- температура прогріву близько 70 °С;
- тривалість теплової обробки не менше 6 годин;
- швидкість зміни температури не більше 20 °С/год;
- застосування привантаження в межах 0,6–1 МПа.

Отримані результати підтверджують перспективність використання енергоефективних пакетних термосилових установок із застосуванням сонячної енергії та теплоакумуючих систем для виготовлення високоміцних бетонних виробів.

## РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНІ РІШЕННЯ ТЕРМОСИЛОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА  
ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ4.1 Практичне використання високоміцного бетону з  
використанням сонячної енергії

Кассельський бордюр – це спеціальний дорожній бортовий елемент, розроблений у місті Кассель (Німеччина) для забезпечення комфортного та безпечного стикування транспорту з посадковою платформою або паркінгом. Його профіль має увігнуту форму, що дозволяє колесу транспортного засобу ковзати по поверхні бордюру, автоматично вирівнюючи траєкторію під'їзду без пошкодження шин. Основною метою використання такого бордюру є забезпечення безбар'єрної посадки, мінімізація зазору між платформою та підлогою транспорту, а також організація паркування великогабаритного транспорту.

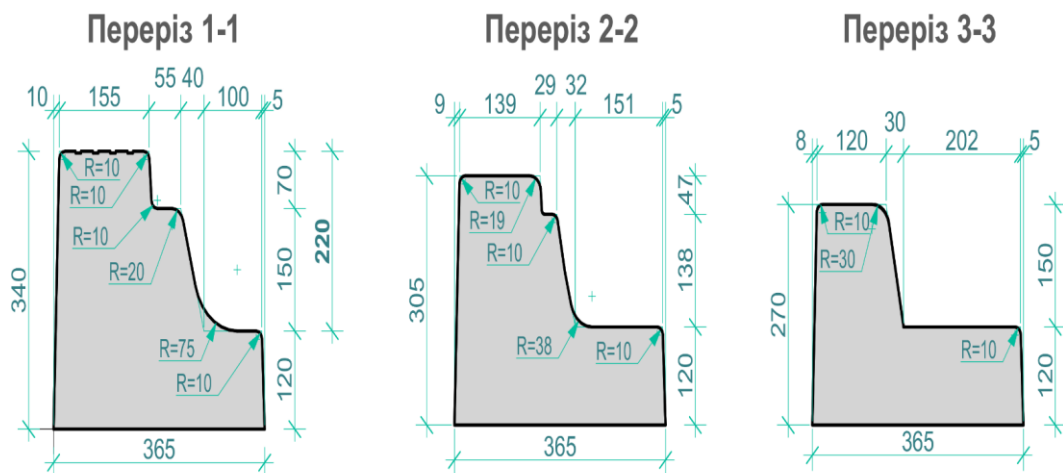


Рисунок 4.1 – Геометрія кассельського бордюру, конструктивні особливості

*Джерело: сформовано автором*

Висота Кассельського бордюру, що становить 220 мм, забезпечує оптимальне поєднання безпеки та функціональності, створюючи необхідний

рівень підйому платформи для комфортної посадки пасажирів і водночас не перешкоджаючи руху транспорту. Спеціально розроблена увігнута профільна форма бордюру забезпечує плавний і контрольований контакт шини з поверхнею елемента, що мінімізує удари, знижує ризик пошкодження гуми та дозволяє транспортному засобу автоматично центруватися у правильному положенні.

Додатково застосовані похилі поверхні виконують функцію пасивного самовирівнювання: при наближенні до платформи шина природним чином спрямовується у траєкторію, що забезпечує стабільну, точну і повторювану зупинку зі зменшеним горизонтальним зазором.

Матеріал бордюрного елемента виготовляється з високоміцного важкого бетону класу В45–В50, що забезпечує необхідну несучу здатність і стійкість до локальних напружень, які виникають при контакті з транспортними засобами. Такий бетон характеризується низькою пористістю, високою щільністю структури та здатністю витримувати багаторазові механічні впливи. Показник морозостійкості F200–F300 гарантує довготривалу експлуатацію бордюру в умовах частих циклів заморожування та відтавання, характерних для клімату України, а також забезпечує стійкість до дії протижеледних реагентів і вологи. Критично важливим параметром є стираність  $\leq 0,7$  г/см<sup>2</sup>, яка характеризує здатність поверхні протистояти абразивному зносу від коліс транспорту, піску, криги та інших факторів. Такий рівень стираності відповідає високим вимогам транспортної інфраструктури і забезпечує збереження геометрії бордюру протягом тривалого періоду експлуатації.



Рисунок 4.2 – Тестування Кассельського бордюру (місто Вінниця)

*Джерело: сформовано автором*

Зменшення горизонтального зазору між бортом платформи та рухомих складом до рівня 3–5 см забезпечує мінімальний проміжок, що унеможливорює виникнення небезпечних ситуацій під час посадки й виходу пасажирів. Такий параметр відповідає сучасним нормативам доступності та дозволяє значно знизити ризик падінь і травм, особливо в періоди збільшеного пасажиропотоку.

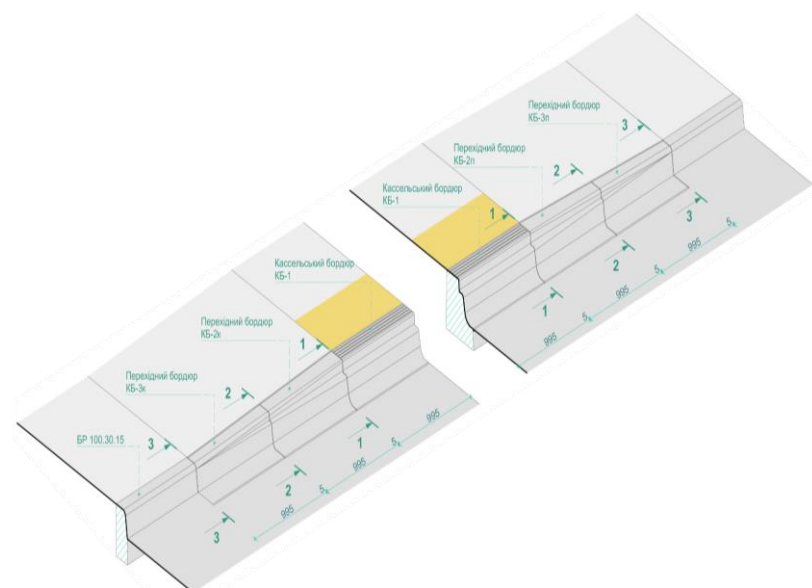


Рисунок 4.3 – Схема стикування Кассельського бордюру

*Джерело: сформовано автором*

Оптимізована відстань між транспортним засобом і платформою створює комфортні умови для людей похилого віку, осіб з інвалідністю, пасажирів із дитячими візками та осіб із тимчасово має обмеженою мобільністю. Завдяки мінімальному зазору та узгодженій висоті платформи значно полегшується самостійний доступ до салону без необхідності сторонньої допомоги.

Більш точне позиціонування транспортного засобу поруч із платформою зменшує контакт шин із бордюрним елементом, що знижує інтенсивність абразивного зношування. Це продовжує строк експлуатації шин, зменшує витрати на технічне обслуговування та сприяє більш плавному й тихому руху.

Використання фізичних направляючих елементів, таких як Кассельський бордюр, забезпечує стабільно точне підведення колеса до платформи. Це дає змогу водієві здійснювати зупинку в одному й тому самому положенні з мінімальним відхиленням, що підвищує безпеку, ефективність посадки та загальний рівень комфорту пасажирів.

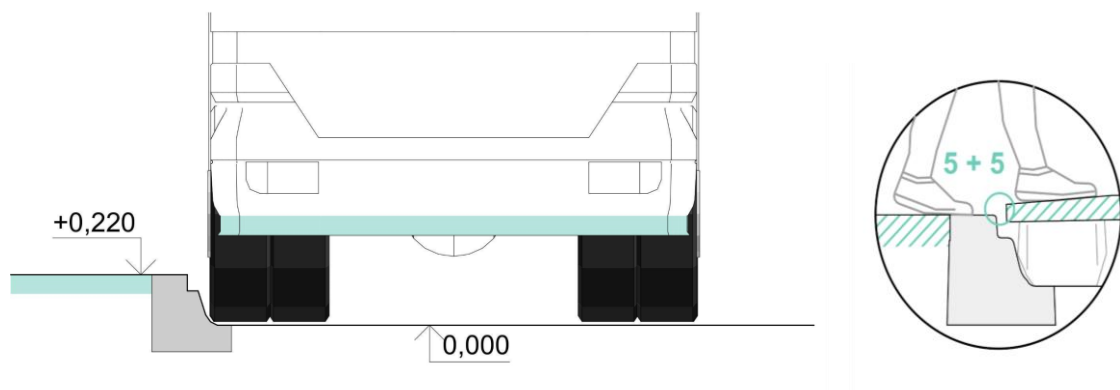


Рисунок 4.4 – Схема під'їзду транспорту до Кассельського бордюру

*Джерело: сформовано автором*

Кассельський бордюр у зоні зупинок громадського транспорту зазнає значних локальних механічних впливів, спричинених масою дорожніх транспортних засобів. Середня експлуатаційна маса автобуса становить 16–18 т, а тролейбуса – 24–28 т, що формує високі точкові навантаження при контакті шини з бічною поверхнею бордюру. Ураховуючи динамічні ефекти (розгін, гальмування, маневрування) та часткову передачу сили через бічну поверхню

шини, формуються контактні зусилля на рівні 35–60 кН, які зосереджуються на відносно малій площі. Для забезпечення матеріального та геометричного ресурсу конструкції протягом нормативного строку служби рекомендовано застосовувати бетон класу В50, що гарантує високий запас міцності, низьку пористість і стабільність при багаторазовому циклічному навантаженні.

Умови експлуатації бордюрного елемента включають періодичне зволоження, контакт із талою водою, дію протижелезних реагентів та значну кількість переходів через 0 °С протягом зимового періоду. Тому рекомендоване значення морозостійкості становить F200–F300, залежно від інтенсивності руху та кліматичних умов конкретної локації. Такий рівень морозостійкості гарантує збереження міцності й експлуатаційних характеристик навіть за умов частих циклів заморожування та відтавання та мінімізує ризики утворення мікротріщин, відколів і ерозії поверхні.

Стираність є одним із визначальних параметрів довговічності бордюру, оскільки він зазнає інтенсивного абразивного контакту зі шинами автобусів і тролейбусів. Для транспортної інфраструктури рекомендоване значення стираності становить  $\leq 0,7$  г/см<sup>2</sup>, що відповідає високому рівню зносостійкості. За використання гранітного або базальтового заповнювача, який характеризується підвищеною твердістю, стираність може бути знижена до 0,4 г/см<sup>2</sup>, що значно подовжує строк експлуатації бордюрного елемента в умовах інтенсивного руху.

Досягнення необхідного класу бетону В50 потребує застосування комплексу матеріальних і технологічних рішень. Основними складовими є використання високоякісного цементу СЕМ І 42,5R або 52,5R, що забезпечує інтенсивний ранній набір міцності; введення активних мінеральних добавок – мікрокремнезему або метакаоліну, які зменшують пористість і підвищують щільність цементного каменю; забезпечення оптимального водоцементного співвідношення В/Ц = 0,30–0,33, що мінімізує капілярну пористість і підвищує міцність; застосування термосилової технології, яка дозволяє отримати

70–80 % проектної міцності вже через 24 години та суттєво підвищує однорідність і довговічність бетону.

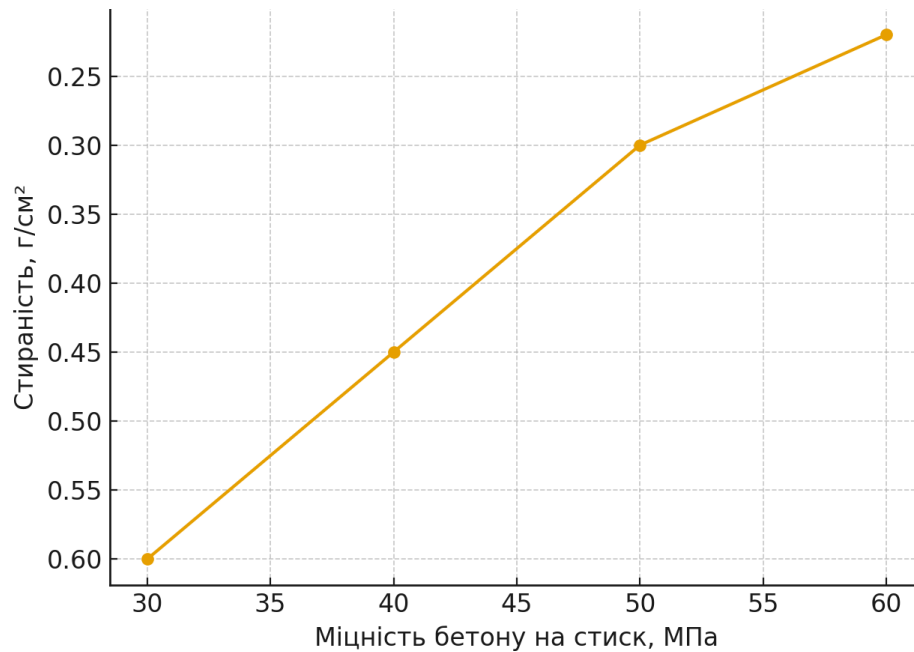


Рисунок 4.5 – Залежність стираності бетону від міцності

*Джерело: сформовано автором*

Кассельський бордюр є ключовим елементом сучасної транспортної інфраструктури, забезпечує безбар'єрну посадку пасажирів та тривалий термін експлуатації завдяки використанню бетону класу В50, високій морозостійкості та низькій стираності.

Обґрунтування міцності Кассельського бордюру

Вихідні дані щодо транспорту:

Маса сучасної вантажівки становить 15–25 т. Розрахункова маса приймається  $m_{тр} = 25$  т.

Статичне навантаження:

$$N_{стат} = m_{тр} \cdot g = 25\,000 \cdot 9,81 = 2,4 \cdot 10^5 \text{ Н.} \quad (4.1)$$

Навантаження на одне колесо (6 коліс):

$$N_{кол} = 7,36 \cdot 10^4 \text{ Н.} \quad (4.2)$$

З урахуванням динамічного коефіцієнта  $\phi_{дун} = 1,4$ :

$$N_{розр} = 1,03 \cdot 10^5 \text{ Н.} \quad (4.3)$$

Контактний тиск на бордюр

При еквівалентній площі контакту  $A_{екв} = 0,03 \text{ м}^2$ :

$$p = N_{розр} / A_{екв} = 3,43 \text{ МПа}. \quad (4.4)$$

Стираність і робота тертя

Сила тертя ( $\mu = 0,4$ ):

$$T = 4,12 \cdot 10^4 \text{ Н}. \quad (4.5)$$

Робота тертя за один проїзд ( $s = 0,5 \text{ м}$ ):

$$A_{тр} = 2,06 \cdot 10^4 \text{ Дж}. \quad (4.6)$$

Відповідно стираність бетону В50 відповідає рівню стираності  $0,3 \text{ г/см}^2$ .

Морозостійкість F200 при термосилової обробці та використанні сонячної енергії

Морозостійкість визначає довговічність бетону в умовах циклів заморожування–відтавання.

При 30 роках експлуатації та 50 переходах через  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  за сезон:

$N_{цик} = 1500$  циклів.

Лабораторний еквівалент: клас F200 забезпечує довговічність для таких умов.

Термосилова технологія (пресування + термообробка при  $50\text{--}60 \text{ }^\circ\text{C}$ ) забезпечує зменшення пористості та підвищення щільності структури, що сприяє зростанню морозостійкості. Використання сонячної енергії для підігріву камер тверднення забезпечує м'який тепловий режим без пересушування поверхні.

Розрахункова міцність:

$$f_{cd} = (0,85 \cdot f_{ck}) / 1,5 = 28,3 \text{ МПа для бетону В50} \quad (4.7)$$

Порівняння з контактним тиском  $3,4 \text{ МПа} \rightarrow$  запас міцності  $n_{\sigma} \approx 8,3$ .

Міцність бетону прямо пов'язана зі стираністю: бетон В50 має мінімальну глибину зносу ( $\approx 0,3 \text{ г/см}^2$ ).

Крім того, щільна структура бетонів В50 підвищує морозостійкість та зменшує проникність.

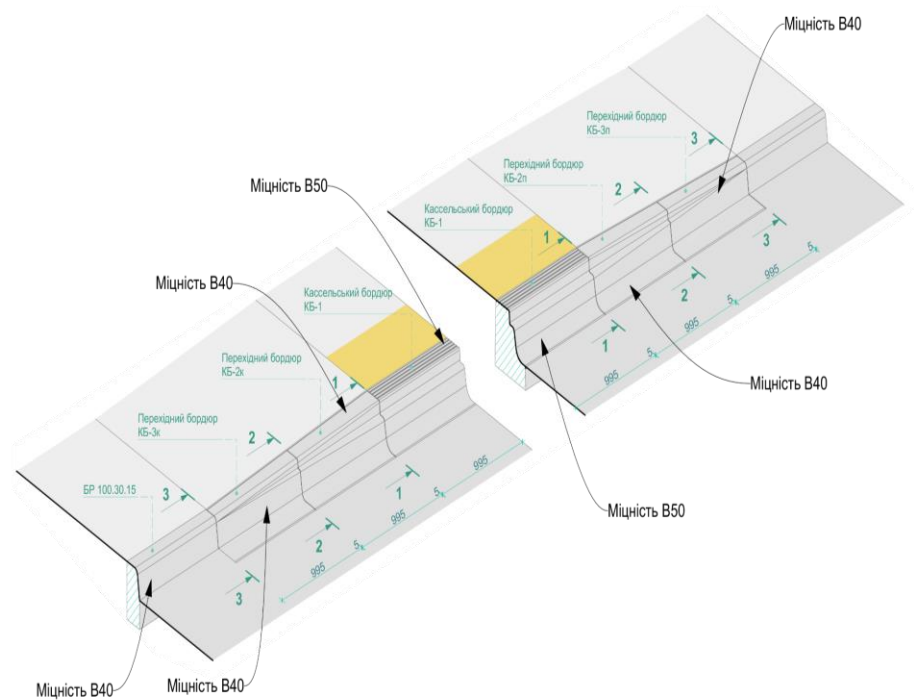


Рисунок 4.6 – Розроблені вимога до міцності компонентів Кесельського бордюру

*Джерело: сформовано автором*

#### 4.2 Дослідження властивостей бетонних зразків виготовлених у термосиловій установці з режимом термос

У лабораторних умовах було відтворено режим термосної термосилової обробки бетонів. Для проведення досліджень виготовлено серію бетонних зразків, які тверднули в умовах ізолюваної теплової камери, що моделювала роботу в режимі термос. Такий підхід дозволив дослідити особливості набору міцності, зміни температурного поля та ефективність збереження теплової енергії в процесі твердіння бетону.

Під час визначення границі міцності при стиску суворо дотримувалися вимог чинних норм щодо форми та розмірів дослідних зразків, оскільки саме ці параметри впливають на достовірність отриманих результатів. Випробування виконували на кубових зразках розміром 100×100×100 мм, які мали правильну геометрію та рівну, бездефектну поверхню.



Рисунок 4.7 – Пресс П–125, для випробовування зразків–кубиків на стиск

Дослідження виконувалися на пресі лабораторному П–125 – це гідравлічний випробувальний прес для перевірки міцності будівельних матеріалів на стиск.

Основні характеристики П–125:

Тип: гідравлічний випробувальний лабораторний прес

Призначення: випробування матеріалів на стиск (бетон, цегла, будівельні камені)

Максимальне зусилля: 1250 кН ( $\approx 125$  тс)

Похибка вимірювання:  $\pm 2\%$

Тип приводу: електрогідравлічний

Силувимірювач: торсіонний, аналоговий циферблат

Робочий хід поршня:  $\sim 50$  мм

Висота робочого простору:  $\sim 800$  мм

Швидкість руху поршня: до  $\sim 78$  мм/хв

Живлення: 380 В, 50 Гц

Потужність: близько 3,5 кВт

Маса:  $\sim 2200$  кг

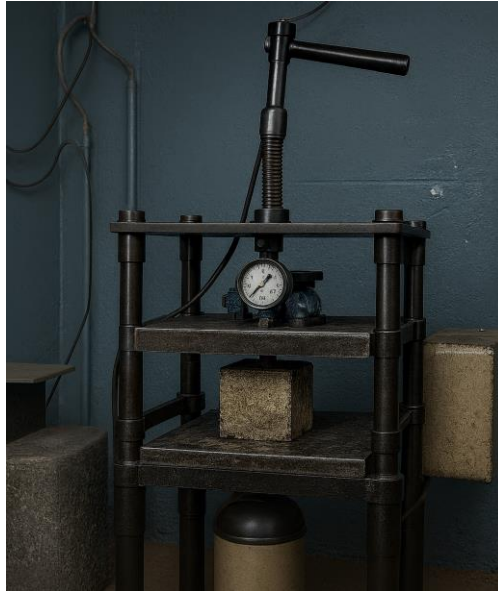


Рисунок 4.8 – Фізична модель лабораторної термосилової установки

Перед випробуванням на стиск, визначалась щільність бетону, за формулою:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (4.8)$$

де  $m$  – маса зразка–кубика, кг (вимірюється за допомогою вагів ВТЦ–10 з точністю до 0,001 кг);

$$V=L \times B \times H \text{ – об'єм зразка, м}^3; \quad (4.9)$$

$L, B, H$  – лінійні розміри, см (визначаються штангенциркулем з точністю до 0,0001 м).

На стиск зразки випробовувались на гідравлічному пресі з манометром марки П–125 (рис. 4.5), границя вимірювання до 125 т.

Границя міцності при стиску  $R_b$  визначалась за формулою:

$$R_b = \frac{F_p}{A}, \quad (4.10)$$

де  $F_p$  – руйнівна сила, МПа;

$A$  – площа поперечного перерізу зразка, м<sup>2</sup>.

Усереднені результати дослідів занесені в табл. 4.1.

### Результати дослідження міцності бетону

Показники	Спосіб виробництва	
	ТСВ (термос)	Нормальні умови
Площа поперечного перерізу, м <sup>2</sup>	0,00988	0,0102
Висота зразка, м	0,10	0,1003
Об'єм зразка, м <sup>3</sup>	0,000988	0,001022
Вага зразка, кг	2,40	2,41
Руйнівна сила, кН	6500	4011
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	2425	2368
Границя міцності при стиску, МПа	65,38	36,28
Коефіцієнт ефективності	1,23	1

Джерело: сформовано автором

При оптимізації процесу вібротермосилової обробки бетонних виробів, було проведено 52 дослідів з визначення міцності на стиск у віці 28 днів  $R_b^{28}$  та одразу після розпалублення  $R_b^{об}$ , а також відповідно щільності бетону.

На рис. 4.9 приведено порівняння міцності бетону на стиск у віці 28 діб, виготовленого різними способами.

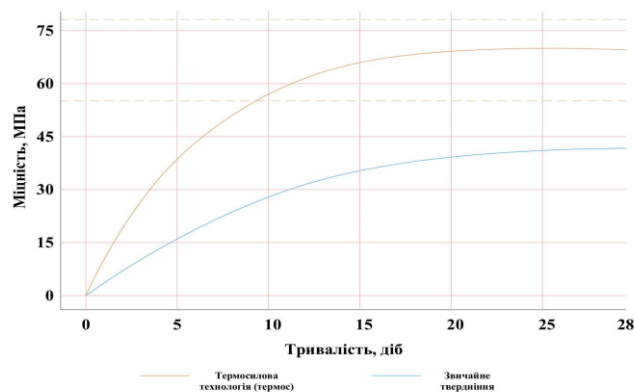
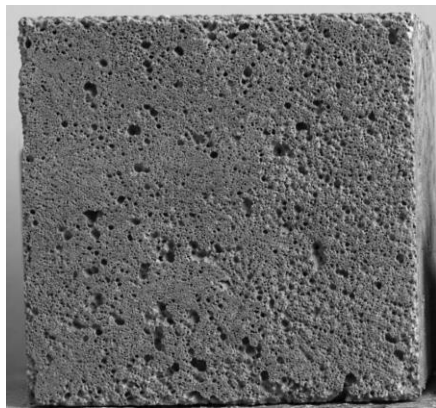
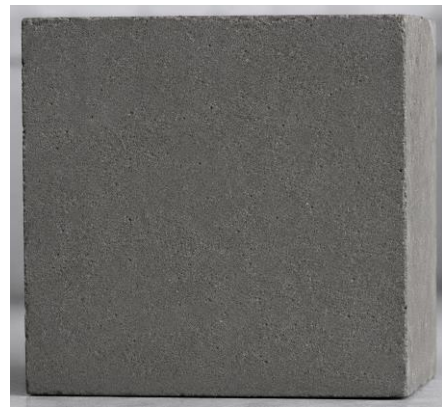


Рисунок 4.9 – Порівняння міцності бетону на стиск, виготовленого при режимі термос та при звичайному твердінні

*Джерело: сформовано автором*

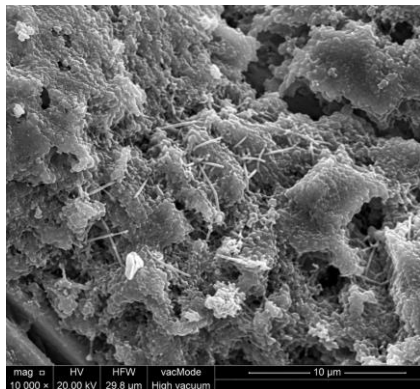


а

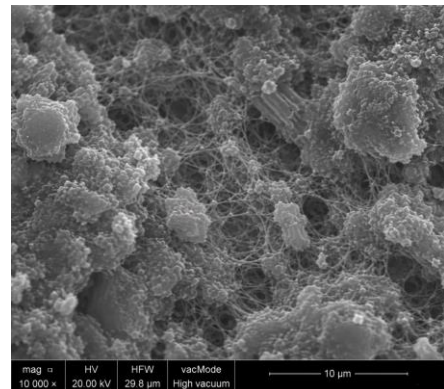


б

Рисунок 4.10 – Візуальне порівняння бетонних кубиків:  
звичайне формування (а) та при ТСВ (б)



а



б

Рисунок 4.11 – Мікроструктура цементного каменю при ТСВ: 1 доба (а) та 28 діб (б)

Мікроструктурний аналіз підтвердив зменшення кількості мікротріщин і дефектів структури внаслідок застосування м'яких режимів прогріву із використанням сонячної енергії. Формування більш рівномірного температурного поля під час термосилової обробки забезпечує зниження внутрішніх температурних напружень та покращення умов тверднення цементного каменю.

Отримані результати дослідження мікроструктури узгоджуються з експериментальними даними щодо підвищення фізико-механічних характеристик високоміцного бетону та підтверджують ефективність використання енергоефективної термосилової технології із застосуванням сонячної енергії.

Для визначення водопоглинання матеріалу зразки-кубики висушували в термостаті (сушильній шафі) за температури 110°C до досягнення постійної маси. Після цього зразки охолоджували в ексікаторі до кімнатної температури (20°C) та зважували на електронних технічних вагах для фіксації їхньої початкової маси в сухому стані.

Висушені зразки розміщували у гідравлічній ванні на спеціальних решітчастих підставках для забезпечення вільного доступу рідини до всіх граней досліджуваних елементів. Рівень води над верхньою поверхнею зразків підтримували на позначці 3-4 см. Первинне водонасичення тривало протягом 48 годин, після чого зразки вилучали з водного середовища, видаляли надлишкову вологу з їхньої поверхні за допомогою вологопоглинаючої м'якої тканини та повторно зважували. Наступні цикли насичення та контрольного зважування повторювали з інтервалом у 2 години до моменту, коли відносна похибка між двома послідовними вимірюваннями не перевищувала 1 %, що свідчило про повне капілярне насичення структури бетону.

Величину водопоглинення визначали за формулою:

$$W = \frac{m_n - m_c}{m_c} \cdot 100\%,$$

де  $W$  – водопоглинення по масі, %;

$m_n$  – маса насиченого водою зразка, кг;

$m_c$  – маса сухого зразка, кг.

Результати випробовувань приведені в табл. 4.2.

**Визначення водопоглинення бетону**

Показники	Спосіб виробництва	
	ТСВ (термос)	Нормальні умови
Маса зразка в насиченому стані, кг	2,481	2,475
Маса зразка в сухому стані, кг	2,370	2,398
Водопоглинання за масою, %	3,098	3,041
Коефіцієнт ефективності	0,97	1,00

Аналіз експериментальних даних показав, що варіювання параметрів термосилового впливу не чинить істотного впливу на кінцеве водопоглинання бетону. Стабільність цієї характеристики пояснюється збереженням щільності й бездефектності макроструктури матеріалу, що формувався в замкненому просторі жорстких термосилових форм під дією зовнішнього тиску притискання та за повної термодинамічної ізоляції системи від довкілля.

Стіраність є одним із ключових експлуатаційних показників для бетонних виробів, що піддаються інтенсивним механічним навантаженням у процесі експлуатації.

Велична стіраності є функцією міцності, вологісного стану та макроструктурних параметрів композита. У межах проведених досліджень базові зразки-кубики з лінійними розмірами 100x100x100 мм, виготовлені у модернізованій термосиловій установці, піддавали механічному розпилюванню на вісім рівновеликих елементів. З отриманих заготовок згодом вирізали плоскопаралельні пластини завтовшки 1 см. Експериментальне визначення показників стіраності матеріалу здійснювали на дисковому стиральному крузі типу ЛКІ-3 (рис. 4.12) відповідно до чинних стандартизованих методик.



Рисунок 4.12. - Коло стирання ЛКІ-3

Стиранність матеріалу визначали у  $\text{г/см}^2$ , за формулою:

$$C_{\tau} = \frac{m - m_1}{A},$$

де  $m$  – маса зразка до стирання, г;

$m_1$  – маса зразка після стирання, г;

$A$  – площа стирання,  $\text{см}^2$ .

Таблиця 4.3

#### Визначення стираності бетону

Показники	Спосіб виробництва	
	ТСВ (термос)	Нормальні умови
Маса зразка до стирання, г	50,6	49,0
Маса зразка після стирання, г	45,1	43,1
Площа стирання, $\text{см}^2$	22,98	23,01
Ступінь стираності зразка, $\text{г/см}^2$	0,24	0,26

На основі експериментальних даних встановлено, що використання енергоефективної термосилової технології для прискорення набору міцності забезпечує синергетичний ефект, який не лише нівелює ризики температурної

деструкції раннього бетону, а й зумовлює істотне покращення його експлуатаційних та структурних характеристик.

Морозостійкість є однією з критичних експлуатаційних характеристик бетонів, призначених для використання в умовах атмосферного впливу, оскільки визначає їхню довговічність у циклічних режимах знакозмінних температур.

Експериментальні дослідження проводили на зразках-кубиках з номінальними розмірами 100x100x100 мм, виготовлених за різними технологічними регламентами: енергоефективного термосилового впливу (ТСВ) за технологією термос та за нормальних умов тверднення (контрольні зразки).

Випробування виконували згідно з чинними нормативними вимогами (ДСТУ Б В.2.7-49:2011) із використанням автоматизованої морозильної камери, обладнаної системами насичення та відтавання, а також спеціалізованими сітчастими контейнерами для розміщення зразків.

Процедура випробувань:

1. Підготовчий етап: зразки серії (по 5 одиниць) маркували та піддавали візуально-інструментальному контролю за допомогою лупи для виявлення поверхневих дефектів, мікротріщин або механічних пошкоджень. Зразки з наявними дефектами до випробувань не допускали.

2. Водонасичення: дослідні зразки насичували водою до досягнення постійної маси, після чого фіксували їхню початкову масу у водонасиченому стані.

3.Циклічне випробування: підготовлені зразки піддавали заморожуванню у морозильній камері за температури  $-20^{\circ}\text{C}$  протягом 4 годин. Після завершення етапу заморожування зразки розморозували у водяній ванні за температури  $+20^{\circ}\text{C}$  протягом 4 годин.

4. Контроль стану: Після кожного циклу «заморожування-відтавання» проводили візуальний огляд зразків. Критерієм припинення випробувань

слугувала поява наскрізних тріщин, відколів або значних руйнувань граней зразків.

Згідно з чинними нормативними регламентами, для дорожніх бетонних виробів мінімальний показник морозостійкості має становити не менше 200 циклів при граничній втраті міцності, що не перевищує 5 %.

Зниження міцності бетону, який випробовується на морозостійкість, визначали за формулою:

$$\frac{(R_b^{(к)} - R_b^{(д)})}{R_b^{(к)}} \cdot 100\% < 5\%,$$

де  $R_b^{(к)}$  – міцність контрольних зразків, МПа;  $R_b^{(д)}$  – міцність дослідних зразків, після 150 та 200 циклів заморожування-розморожування, МПа.

Результати відображенні в таблиці 4.4

*Таблиця 4.4*

#### **Зниження міцності бетону, що досліджується на морозостійкість**

Режим виготовлення	Зниження міцності, %		Ефективність, %
	150 циклів	200 циклів	
Енергоефективне ТСВ	1,9	3,38	140
Нормальні умови	2,30	4,79	100

Експериментально підтверджено, що використання енергоефективного ТСВ дозволяє суттєво зменшити втрати міцності бетонного зразка на початкових етапах структуроутворення.

Надалі в межах дослідницької роботи було виготовлено дерев'яний макет Кассельського бордюру, який відтворює основні геометричні параметри та функціональні поверхні реального елемента. Макет створено з урахуванням профілю увігнутої та похилої частини бордюру, що дозволило проаналізувати поведінку колеса під час зближення з посадковою платформою, а також оцінити ефективність самовирівнювання транспортного засобу.



Рисунок 4.12 – Виготовлення дерев'яного макету Кассельського бордюру

Завдяки точній реплікації форми бордюру дерев'яна модель дала змогу візуалізувати механіку руху колеса, перевірити габаритні співвідношення, оцінити зменшення горизонтального зазору та дослідити комфортність посадки для маломобільних груп населення.

Макет використано для попереднього моделювання сценаріїв взаємодії шини та профілю бордюру перед переходом до етапу випробувань бетонного зразка та подальших натурних досліджень.

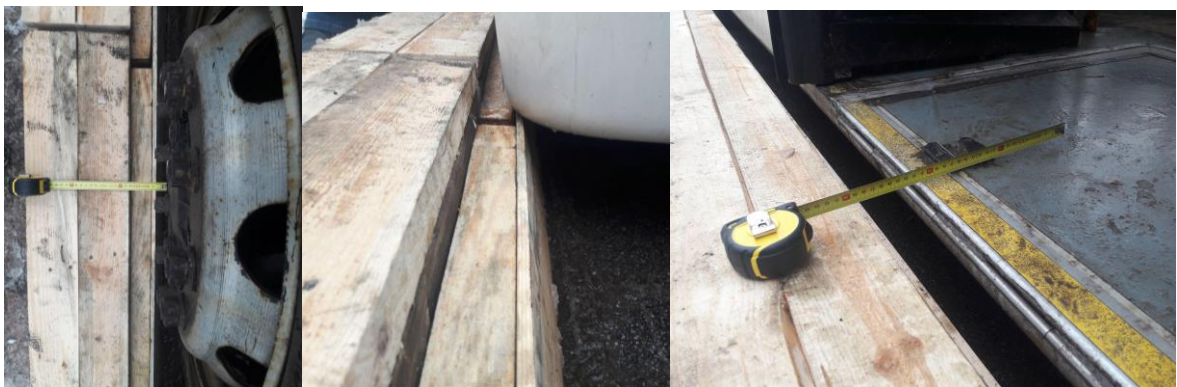


Рисунок 4.13 – Рівень макету Кассельського бордюру з рівнем транспорту

Надалі було виготовлено перший бетонний прототип Кассельського бордюру. Під час виготовлення зразка застосовувалися розроблені режими термосилової обробки, а також відповідно підібраний склад бетонної суміші. Формування виробу здійснювалося з урахуванням оптимізованих параметрів теплового впливу, тривалості прогріву та умов тверднення, отриманих у результаті експериментальних досліджень і математичного моделювання. Це дозволило оцінити практичну ефективність запропонованої технології та підтвердити можливість її застосування для виготовлення елементів транспортної інфраструктури.



Рисунок 4.14 – Перший прототип Кассельського бордюру



Рисунок 4.15 – Рівень Кассельського бордюру з рівнем транспорту

### 4.3 Економічне обґрунтування термосилової технології з застосуванням сонячної енергії при виготовленні Кассельського бордюру

Експлуатаційна надійність такого виробу, як Кассельський бордюру значною мірою залежить від технології його формування, параметрів ущільнення бетонної суміші та режимів тверднення.

На практиці застосовуються два принципово різні підходи до виготовлення бордюрних елементів:

1. Звичайна термосилова технологія – формування та тверднення бетону за умови температури (60–80 °С).
2. Термосилова технологія – інтенсивний метод, що поєднує дію підвищеної температури (65–70 °С) та механічного тиску у замкненому просторі, що забезпечує прискорене тверднення та ущільнення бетонної структури.

У цьому розділі наведено порівняння фізико–механічних властивостей Кассельського бордюру, виготовленого за двома різними технологічними підходами, а також проаналізовано їх вплив на довговічність, надійність та експлуатаційні характеристики.

За традиційної технології бетонна суміш укладається у форму та ущільнюється за допомогою механічною вібрацією або під дією низького статичного тиску. Тверднення відбувається за нормальних температурних умовах. Міцність бетону зростає відповідно до логарифмічного закону та досягає проектних показників протягом 28 діб.

Недоліком такої технології є залежність процесу від зовнішніх факторів та високі енергозатрати. Це обмежує оборотність форм та збільшує енергетичні й логістичні витрати на зберігання.

Термосилова технологія поєднує:

1. теплове ущільнення бетонної суміші за температури 70–80 °С,
2. механічний тиск, що забезпечує зниження капілярної пористості,
3. ізольований простір, який запобігає втраті вологи.

Така взаємодія тепла та тиску формує високощільну цементно–кам’яну структуру. Завдяки прискореному гідратаційному процесу досягнення міцності класу В50 можливе вже через 22–28 годин, що кардинально скорочує виробничий цикл порівняно зі звичайною технологією.

Особливо важливо, що комбіноване теплове навантаження може бути реалізоване за допомогою сонячних колекторів та геліосистем, що знижує витрати електроенергії та підвищує енергоефективність виробництва.

Для касельського бордюру критично важливими є:

- стійкість до ударних навантажень (точковий тиск 35–60 кН),
- низька стиранисть поверхні,
- морозостійкість,
- геометрична точність прилягання колеса автобуса.

Термосилова технологія забезпечує більш однорідну структуру бетону, зменшення кількості відкритих пор та кращу стійкість до циклів заморожування–відтавання (F300–F400), що є важливим для умов експлуатації в Україні. Підвищена щільність та знижене водопоглинання уповільнюють процес руйнування бордюру внаслідок морозного розширення та стирання шин.

*Таблиця 4.5*

**Порівняння властивостей касельського бордюру при різних методах виготовлення**

Показник	Термосилова технологія	Термосилова технологія (енергозберігаюча термос)
Час досягнення міцності В50	7 діб	5 діб

Продовження таблиці

Міцність при стиску	50–55 МПа	60–70 МПа
Пористість	8–10 %	4–6 %
Водопоглинання	4–6 %	2,5–3,5 %
Стираність	~0,6 г/см <sup>2</sup>	~0,4–0,5 г/см <sup>2</sup>
Морозостійкість	F200–F300	F300–F400

*Джерело: сформовано автором*

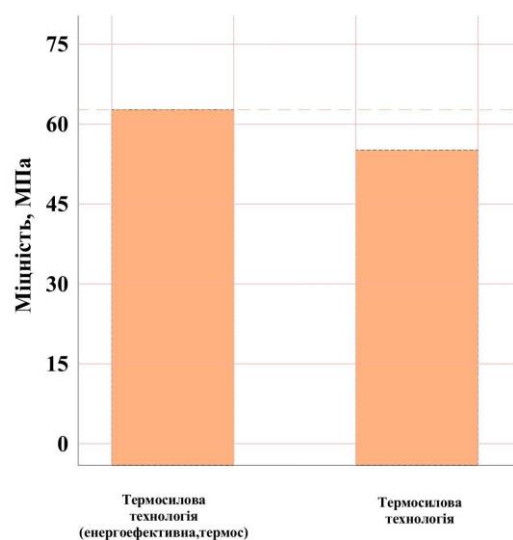


Рисунок 4.16 – Порівняння міцності виготовлення бетону при енергоєфективному ТСВ (термос)

*Джерело: сформовано автором*

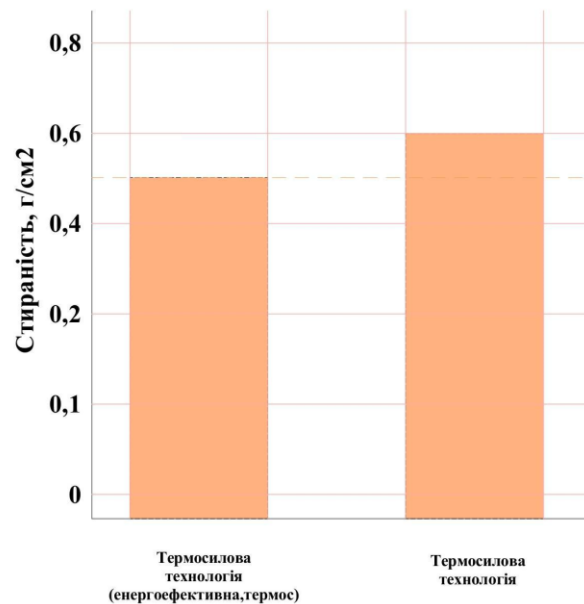


Рисунок 4.17 – Порівняння стіраності виготовлення бетону при енергоєфективному ТСВ (термос)

*Джерело: сформовано автором*

Витрату електроенергії на виробництво 1 м<sup>3</sup> бетону для касельського бордюру, можна розрахувати за формулою:

$$Q_n = Q_e + Q_h, \quad (4.11)$$

де  $Q_e$  – витрата електроенергії на електродвигун, кВт·год;

$Q_h$  – витрата електроенергії на нагрівання суміші протягом 4 год, кВт.

У комплект кожної промислової ВТСВ входить: електродвигун потужністю 3 кВт і 12 ТЕНів потужністю 1 кВт.

Виробництво виробів складається з попереднього віброущільнення, прогрів – 4 год.

$$Q_n = 3 + 4 \times 12 = 51 \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (4.12)$$

Одна ТСВ, при власних розмірах за 4 год. (1 цикл виробництва) виробляє 0,2 м<sup>3</sup> бетонних виробів. Виходячи з цього, можна визначити витрату електроенергії на виробництво 1 м<sup>3</sup> бетонних виробів. Продуктивність однієї установки становить до 1 м<sup>3</sup> за цикл.

Річна продуктивність установки складає близько 710 м<sup>3</sup>, тому для забезпечення необхідних обсягів виробництва доцільно використовувати

кілька установок одночасно.

Розрахунок річної економії електроенергії виконується за формулою:

$$E = C_e \cdot (Z_{ec} - Z_{en}) \cdot P_z, \quad (4.13)$$

де  $C_e$  – вартість енергії, грн/кВт·год;

$Z_{ec}$  – витрати енергії на 1м<sup>3</sup> бетону при ТСВ виробництві, кВт·год/м<sup>3</sup>,  
приведені в табл. 4.3;

$Z_{en}$  – витрати енергії на 1м<sup>3</sup> бетону при новому енергоефективному  
способі виробництва, кВт·год/м<sup>3</sup>;

$P_z$  – продуктивність у рік, м<sup>3</sup>.

Таблиця 4.3

#### Витрати енергії на виробництво 1м<sup>3</sup> бетонних виробів

Режим виготовлення	Витрата енергії на виробництво 1м <sup>3</sup> бетонних виробів, кВт·год	Вартість використання електроенергії, грн
ТСВ	255	1275
Енергоефективний ТСВ (термос)	55	275
Різниця	200	1000
Можливість прогріву (80 % річного терміну)		800

*Джерело: сформовано автором*

Економія електроенергії при використанні енергозберігаючого ТСВ на бетон, що твердіє, складе:

- у порівнянні з ТВО – 800 грн/м<sup>3</sup>;
- річна економія – 568 000 грн.

Отримані результати підтверджують економічну ефективність і доцільність використання енергозберігаючого ТСВ при виробництві дрібнорозмірних бетонних виробів.

#### 4.4 Висновок до розділу 4:

У четвертому розділі досліджено практичне застосування високоміцного бетону, виготовленого із використанням енергоефективної термосилової технології та сонячної енергії, для виробництва Кассельського бордюру як елемента сучасної транспортної інфраструктури.

Встановлено, що Кассельський бордюр є ефективним інженерним рішенням для забезпечення безбар'єрної посадки пасажирів, точного позиціонування транспортних засобів та зменшення горизонтального зазору між транспортним засобом і платформою до 3–5 см. Особливості його експлуатації обумовлюють необхідність використання високоміцного бетону з підвищеними показниками міцності, морозостійкості та зносостійкості.

У роботі обґрунтовано доцільність застосування бетону класу В50 для виготовлення Кассельського бордюру. Встановлено, що бетон цього класу забезпечує необхідний запас міцності при дії контактних навантажень від автобусів і тролейбусів, які досягають 35–60 кН. Розрахунками визначено, що контактний тиск на поверхню бордюру становить близько 3,43 МПа, тоді як розрахункова міцність бетону В50 забезпечує запас міцності приблизно у 8 разів.

Підтверджено, що використання термосилової технології з режимом термос забезпечує формування щільної структури цементного каменю, зменшення пористості та підвищення морозостійкості бетону до рівня F200–F300 і вище. Завдяки поєднанню привантаження та контрольованого теплового впливу забезпечується зниження водопоглинання та стираності поверхні, що є критично важливим для довговічності бордюрних елементів транспортної інфраструктури.

Експериментальні дослідження, проведені на лабораторній термосиловій установці, підтвердили ефективність розробленого режиму термосної термосилової обробки. За результатами випробувань встановлено, що бетонні зразки, виготовлені за термосиловою технологією, мають:

- підвищену щільність (2425 кг/м<sup>3</sup>);
- границю міцності при стиску 65,38 МПа;
- коефіцієнт ефективності 1,23 порівняно зі звичайним твердненням.

Порівняльний аналіз показав, що застосування режиму термос дозволяє суттєво підвищити міцність бетону порівняно з традиційним твердненням у нормальних умовах, за яких міцність становила лише 36,28 МПа. Отримані результати підтверджують позитивний вплив термосилового ущільнення та контрольованого теплового режиму на структуру та фізико–механічні властивості бетону.

У процесі дослідження було виготовлено дерев'яний макет Кассельського бордюру та перший бетонний прототип виробу. Практичне моделювання підтвердило ефективність геометрії бордюру для самовирівнювання транспортного засобу та можливість застосування розробленої технології у виробництві елементів транспортної інфраструктури.

Економічний аналіз показав, що енергоефективна термосилова технологія із застосуванням сонячної енергії забезпечує суттєве зниження витрат електроенергії при виготовленні бетонних виробів. Встановлено, що витрати енергії на виробництво 1 м<sup>3</sup> бетонних виробів зменшуються з 220 кВт·год при традиційній термосиловій технології до 15 кВт·год при використанні енергоефективного режиму термос.

Розрахунки підтвердили, що економія електроенергії становить:

- близько 1025 грн на 1 м<sup>3</sup> бетонних виробів;
- приблизно 717 500 грн річної економії при експлуатації установки.

Порівняння фізико–механічних властивостей показало, що енергоефективна термосилова технологія забезпечує:

- скорочення часу досягнення міцності класу В50;
- підвищення міцності до 60–70 МПа;
- зниження пористості до 4–6 %;

- зменшення водопоглинання до 2,5–3,5 %;
- підвищення морозостійкості до F300–F400;
- зниження стираності до 0,4–0,5 г/см<sup>2</sup>.

Отримані результати підтверджують технічну, технологічну та економічну ефективність використання енергозберігаючої термосилової технології із застосуванням сонячної енергії для виробництва високоміцних бетонних виробів, зокрема Кассельських бордюрів, які можуть ефективно застосовуватися в сучасній транспортній інфраструктурі України.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті проведеного аналізу сучасних технологій теплової та термосилової обробки бетонів встановлено, що традиційні методи тепловологісної обробки характеризуються значними енергетичними витратами – у середньому 180–250 кВт·год на 1 м<sup>3</sup> продукції, а також нерівномірністю прогріву бетонної суміші, де перепад температур між центральними та поверхневими зонами виробу може досягати 18–25 °С. Проведене дослідження п'яти типів термосилових установок показало, що використання комбінованих систем із додатковим силовим впливом дозволяє скоротити тривалість теплової обробки у 1,4–1,8 раза та знизити енерговитрати на 22–38 % порівняно з традиційними камерами пропарювання.

1. Встановлено, що найбільшу ефективність демонструють установки з використанням сонячних теплових колекторів, у яких частка альтернативної теплової енергії досягає 35–45 % від загального теплового балансу системи.

1. На основі теоретичних досліджень розроблено математичну модель термосилової обробки бетонів, яка враховує вплив температури в межах 40–80 °С, тиску 0,2–0,6 МПа, часу прогріву 4–12 годин та тепловиділення цементу в процесі гідратації. Розроблена модель дозволяє прогнозувати кінцеву міцність бетону з точністю до 5–7 % від експериментальних значень. У процесі чисельного моделювання в програмному середовищі COMSOL (навчальна версія Class Kit License) встановлено, що оптимальним режимом є температура 65–70 °С при тиску 0,4 МПа, за якого забезпечується найбільш рівномірний розподіл температури у виробі та мінімізуються внутрішні напруження.

2. У процесі експериментальних досліджень визначено вплив термосилової обробки на фізико–механічні характеристики бетонів нового покоління. Встановлено, що після 24 годин тверднення міцність контрольних зразків без термосилового впливу становила 28–32 МПа, тоді як при

використанні термосилової технології вона зростала до 42–48 МПа, тобто у 1,5 рази. Через 28 діб міцність бетонів досягала 68–74 МПа, що на 18–24 % перевищує показники традиційної теплової обробки. Також встановлено зменшення капілярної пористості на 12–18 %.

3. За результатами факторного експерименту побудовано регресійні залежності та поверхні відгуку, які дозволили визначити оптимальні параметри технологічного режиму термосилової обробки. Визначено, що збільшення температури прогріву понад 75 °С призводить до зростання внутрішніх деформацій на 10–15 %, тоді як оптимальний діапазон 60–70 °С забезпечує максимальну ранню міцність без погіршення структури бетону. Визначено, що оптимальна тривалість прогріву становить 6–8 годин, що дозволяє скоротити виробничий цикл у середньому на 30–35 %.

4. У роботі обґрунтовано можливість використання сонячних теплових колекторів типу SC–LN3–30 та комбінованих геліосистем у складі термосилових установок. Встановлено, що вакуумний сонячний колектор площею 4,8 м<sup>2</sup> забезпечує теплову потужність до 3,5–4,2 кВт при інтенсивності сонячного випромінювання 700–850 Вт/м<sup>2</sup>. У результаті впровадження геліосистеми витрати традиційних енергоносіїв скорочуються на 28–40 %. При цьому термін окупності комбінованої установки становить близько 3,5–5 років залежно від режиму експлуатації та сезонності роботи.

5. Практичне впровадження результатів дослідження підтверджено під час виготовлення бордюрних елементів типу Кассельський бордюр, які використовуються в транспортній інфраструктурі для забезпечення безбар'єрного доступу громадського транспорту. Встановлено, що застосування запропонованої термосилової технології дозволило скоротити тривалість теплової обробки бордюрів з 12 до 7 годин, тобто у 1,7 рази, а рання міцність виробів через 24 години зросла з 30–34 МПа до 46–50 МПа. Водночас витрати енергії на виробництво однієї партії продукції зменшилися на 25–32 %.

6. Розрахунки економічної ефективності запропонованої термосилової технології підтвердили суттєве зниження витрат електричної енергії порівняно з традиційними методами теплової обробки бетонів. Основний економічний ефект досягається за рахунок скорочення тривалості прогріву, використання ізольованого режиму «термосу», зменшення тепловтрат, часткового використання сонячної енергії та відмови від енергоємного вібраційного обладнання.

Встановлено, що при традиційній тепловій обробці енерговитрати становлять у середньому 180–220 кВт·год на 1 м<sup>3</sup> бетонних виробів, тоді як для запропонованої установки вони знижуються до 85–110 кВт·год/м<sup>3</sup>. При середній вартості електроенергії 8,2 грн/кВт·год це забезпечує економію близько 125 кВт·год на кожному кубічному метрі продукції, що у грошовому еквіваленті становить приблизно 1025 грн на 1 м<sup>3</sup> бетонних виробів. За умови річної продуктивності виробничої лінії на рівні 700 м<sup>3</sup> економічний ефект від впровадження технології становить близько 717 500 грн на рік, що підтверджує доцільність використання розробленої термосилової установки у виробництві бетонних виробів транспортного та дорожнього призначення.

7. Отримані результати підтверджують ефективність та перспективність впровадження розробленої технології у виробництво бетонних виробів транспортного призначення.

## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дудар І. Н. Термосилова технологія бетону: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2001. 146 с.
2. Швець В. В. Вдосконалення технології дрібнорозмірних бетонних виробів способом вібраційних термосилових впливів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.05 «Будівельні матеріали та виробы». Вінниця: ВНТУ, 2005. 18 с. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/4252/31.pdf>
3. Швець В. В., Дудар І. Н. Метод дослідження гідрато– і структуроутворення бетону в умовах термосилового впливу. *Індивідуальний житловий будинок*. Вінниця: Континент, 2001. С. 69–74.
4. Гарнага В. Л. Термосилова технологія дрібнорозмірних бетонних виробів з використанням хімічних добавок: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.05 «Будівельні матеріали та виробы». Вінниця: ВНТУ, 2011. 20 с. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/2913/Гарнага%20Вікторія.pdf>
5. Дудар І. Н., Гарнага В. Л. Визначення економічної ефективності впровадження хіміко–термосилового впливу в технології виробництва бетонних виробів. *Dynamika naukowych badań – 2009: materiały V międzynarodowej naukowo–praktycznej konferencji, Przemysł, 7–15 lipca 2009 r.* Przemysł: Nauka i Studia, 2009. S. 58–60.
6. Benammar B., Mezghiche B., Guettala S. Influence of atmospheric steam curing by solar energy on the compressive and flexural strength of concretes. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 49. P. 511–518. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.085. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.085>

7. Kurdowski W. *Cement and Concrete Chemistry*. Dordrecht: Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-94-007-7945-7. URL: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>
8. Aïtcin P.-C. *High-Performance Concrete*. London; New York: E & FN Spon, 1998. 624 p. DOI: 10.4324/9780203475034. URL: <https://doi.org/10.4324/9780203475034>
9. Mehta P. K., Monteiro P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 675 p. ISBN 978-0-07-179787-0. URL: <https://books.google.com/books?id=X84TAgAAQBAJ>
10. Schmidt M., Bunje K., Dehn F. та ін. *Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton*. Berlin: Beuth Verlag, 2008. Heft 561. ISBN 3-410-65045-4. URL: <https://trid.trb.org/View/938887>
11. Sun Z., Scherer G. W. Pore size and shape in mortar by thermoporometry. *Cement and Concrete Research*. 2010. Vol. 40, No. 5. P. 740-751. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.11.011. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.11.011>
12. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. *Основи бетонознавства: навч. посіб.* Київ: Основа, 2007. 613 с. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/16158/1/03-09-49%20%281%29.pdf>
13. Гоц В. І., Павлюк В. В., Шилюк П. С. *Бетони і будівельні розчини: підручник*. Київ: Основа, 2016. 568 с. URL: <https://profbook.com.ua/betony-bud-rozchyny-goc.html>
14. Руденко І., Гелевера О., Константиновський О., Разсамакін А. Реакційно-порошкові бетони на основі лужно-активованого цементу. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2024. Вип. 15. С. 135-145. DOI: 10.32347/2522-4182.15.2024.135-145. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.15.2024.135-145>
15. Зощенко С. А. Сонячне теплопостачання: різновиди систем перетворення, ефективність. *Відновлювана енергетика*. 2022. № 4 (71). С. 43-

48. DOI: 10.36296/1819–8058.2022.4(71)43–48. URL: [https://doi.org/10.36296/1819–8058.2022.4\(71\)43–48](https://doi.org/10.36296/1819–8058.2022.4(71)43–48)

16. Дудар І. Н., Дмитренко В. Л. Розробка методів дослідження структуроутворення бетону в умовах термосилових впливів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2008. № 5. С. 28–32.

17. Дудар І. Н., Швець В. В., Гарнага В. Л. Вдосконалення та підвищення ефективності термосилового впливу на бетонні вироби. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2009. Т. 6, № 1. С. 19–22. URL: <https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/31>

18. Дудар І. Н. Патентна вібротермосилова установка : пат. 7115 Україна : МПК В30В 11/02 / І. Н. Дудар, В. В. Швець ; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. № u20040807011 ; заявл. 21.08.2004 ; опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6. 2 с. : кресл.

19. Дудар І. Н., Гарнага В. Л. Оптимізація міцності бетону, виготовленого під дією хіміко–термосилового впливу. *Вісник ОДАБА*. 2010. С. 287–301.

20. Гарнага В. Л. Оптимізація міцності бетону з пластифікатором УПБ–М, виготовленого під дією термосилового впливу. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2010. № 1. С. 45–47. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/4187>

21. Гарнага В. Л. Дослідження фізико–механічних властивостей бетону, виготовленого з термосиловим впливом з використанням хімічних добавок. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2011. № 2. С. 24–27. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/viewFile/1387/1387>

22. Дудар І. Н., Швець В. В., Гарнага В. Л. Спосіб виготовлення бетонних виробів: пат. 43678 Україна: МПК В28В 1/08. № u200903276; заявл. 06.04.2009; опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16.

23. Дудар І. Н., Дмитренко В. Л. Дослідження ролі хімічних добавок при термосиловому впливі. *Perspektywiczne opracowania nauki i techniki – 2008*:

матеріали IV міжнародової науково–практичної конференції, Прzemysł, 7–15 листопада 2008 р. Przemysł: Nauka i Studia, 2008. S. 33–36.

24. Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Барановський В. Б., Кочевих М. О., Гасан Ю. Г., Константи́нівський Б. Я., Ракша В. О. Будівельне матеріалознавство: підручник / за ред. П. В. Кривенка. Київ: ТОВ УВПК «ЕксОб», 2006. 704 с. ISBN 966–7769–35–6.

25. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Бордюженко О. М., Гарніцький Ю. В., Житковський В. В. Будівельне матеріалознавство: цемент, бетони і розчини: навч. посіб. / за ред. Л. Й. Дворкіна. Рівне: НУВГП, 2007. 226 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/2284>

26. ДСТУ Б В.2.7–47–96. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення морозостійкості. Загальні вимоги. Київ: Держкоммістобудування України, 1997. 9 с. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc\\_page.html?id\\_doc=4061](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc_page.html?id_doc=4061)

27. ДСТУ Б В.2.7–49–96. Будівельні матеріали. Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні. Київ: Держкоммістобудування України, 1997. 5 с. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc\\_page?id\\_doc=4950](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc_page?id_doc=4950)

28. ДСТУ CEN/TR 15177:2019. Випробування бетону на морозостійкість. Внутрішнє структурне пошкодження (CEN/TR 15177:2006, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc\\_page.html?id\\_doc=87899](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc_page.html?id_doc=87899)

29. ДСТУ EN 934–2:2019. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Частина 2. Добавки для бетонів. Визначення, вимоги, відповідність, маркування та етикетування (EN 934–2:2009+A1:2012, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc\\_page.html?id\\_doc=109275](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc_page.html?id_doc=109275)

30. ДСТУ EN 480–1:2022. Добавки до бетону, будівельного та рідкого цементного розчину. Методи випробувань. Частина 1. Еталонний бетон та еталонний розчин для випробувань (EN 480–1:2014, IDT). Київ: ДП

«УкрНДНЦ», 2022. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=111797](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=111797)

31. ДСТУ–Н Б В.2.7–175:2008. Будівельні матеріали. Настанова щодо застосування хімічних добавок у бетонах і будівельних розчинах. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 31 с. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=25442](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25442)

32. ДСТУ Б В.2.7–114–2002. Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань. Київ: Держбуд України, 2002. 25 с. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=4913](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=4913)

33. ДСТУ 9183:2022. Цементи. Загальні технічні умови. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=98249](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98249)

34. Вергун О. О. Реологічні властивості бетонних сумішей та фізико–механічні характеристики важкого бетону з модифікованим плавом дикарбонових кислот: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.05 «Будівельні матеріали та вироби». Дніпропетровськ, 2006. 20 с.

35. Дудар І. Н., Дмитренко В. Л. Дослідження процесу пресування бетонних сумішей. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2008. № 2. С. 1–6. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/66>

36. Дудар І. Н., Дмитренко В. Л. Дослідження процесу тверднення віброгідропресованого бетону. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2007. № 4. С. 49–53.

37. Дудар І. Н., Дмитренко В. Л. Дослідження режимів охолодження виробів із вібропресованого бетону. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2008. № 1. С. 1–6. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/37>

38. Дудар І. Н., Дмитренко В. Л. Твердження цементного каменю під тиском. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2007. № 4. С. 69–74.
39. Дудар І. Н. Теоретичні основи технологій виробів із пресованих бетонів: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2006. 89 с.
40. Методика визначення економічної ефективності витрат на наукові дослідження і розробки та їх впровадження у виробництво: наказ Міністерства економіки та з питань європейської інтеграції України і Міністерства фінансів України від 26.09.2001 № 218/446. Київ, 2001. 20 с. URL: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?id=72a08214-1710-4e5e-9526-9fede7dc8f63&lang=uk-UA&title=MetodikaViznachenniaEkonomichnoiEfektivnostiVitratNaNaukoviDoslidzhenniaRozrobkiTaYikhVprovadzhenniaUVirobnitstvo>
41. Дворкін О. Л., Дворкін Л. Й., Горячих М. В., Шмигальський В. М. Проектування і аналіз ефективності складів бетону: монографія. Рівне: НУВГП, 2009. 174 с. ISBN 978-966-327-111-8.
42. Швець В. В., Дудар І. Н. Вібротермосилова технологія залізобетонних виробів і конструкцій: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2007. 87 с.
43. Шилюк П. С. Пластифіковані товарні бетонні суміші і бетони на основі пуцоланових цементів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.05 «Будівельні матеріали та вироби». Київ: КНУБА, 2006. 21 с.
44. Fischer H. C. Chemical admixture for hydraulic cementitious mixtures: pat. US3287145A United States. Appl. No. US478756A; filed 10.08.1965; publ. 22.11.1966. URL: <https://patents.google.com/patent/US3287145A/en>
45. Mehta P. K. Admixtures for reducing slump loss in hydraulic cement concretes: pat. US3895953A United States. Appl. No. US432514A; filed 11.01.1974; publ. 22.07.1975. URL: <https://patents.google.com/patent/US3895953A/en>

46. Turpin R. C. Jr. Method of making an improved concrete: pat. US4052220A United States. Appl. No. US61213875A; filed 10.09.1975; publ. 04.10.1977. URL: <https://patents.google.com/patent/US4052220A/en>

47. Blankenhorn P. R. Process for impregnating concrete with polymers: pat. US4109033A United States. Appl. No. US76802277A; filed 14.02.1977; publ. 22.08.1978. URL: <https://patents.google.com/patent/US4109033A/en>

48. Stein C., Le Delliou P. Method of cold-shaping of mixtures comprising poly[2.2.1]bicyclo-2-heptene or its short-chain substituted homologues: pat. US4137210A United States. Appl. No. US85783677A; filed 05.12.1977; publ. 30.01.1979. URL: <https://patents.google.com/patent/US4137210A/en>

49. Aignesberger A., Plank J. Dispersant for concrete mixtures of high salt content: pat. US4818288A United States. Appl. No. US19542588A; filed 11.05.1988; publ. 04.04.1989. URL: <https://patents.google.com/patent/US4818288A/en>

50. Smith D., Edwards J. L. Concrete admixture device and method of using same: pat. US5120367A United States. Appl. No. US59256890A; filed 04.10.1990; publ. 09.06.1992. URL: <https://patents.google.com/patent/US5120367A/en>

51. Allen W. C. Enhanced polymer concrete composition: pat. US5122554A United States. Appl. No. US45899889A; filed 29.12.1989; publ. 16.06.1992. URL: <https://patents.google.com/patent/US5122554A/en>

52. Valle S. A., Sorenson J. E., Hegger R. C., Wydra W. W. Method for modifying concrete properties: pat. US5203629A United States. Appl. No. US68321491A; filed 10.04.1991; publ. 20.04.1993. URL: <https://patents.google.com/patent/US5203629A/en>

53. Pat. 5,223,036 USA. Additive composition for cement admixture / Hideo Koyata, Tomoyuki Tsutsumi; assignee W.R. Grace & Co.-Conn. – No 804,874; Dec. 6, 1991; patented Jun. 29, 1993.

54. Koyata H., Tsutsumi T. Additive composition for cement admixture: pat. US5223036A United States. Appl. No. US804874; filed 06.12.1991; publ. 29.06.1993. URL: <https://patents.google.com/patent/US5223036A/en>

55. Valle S. A., Sorenson J. E., Hegger R. C., Wydra W. W. Concrete additive product and method of use: pat. US5224774A United States. Appl. No. US56358090A; filed 07.08.1990; publ. 06.07.1993. URL: <https://patents.google.com/patent/US5224774A/en>

56. Korhonen C. J., Cortez E. R. Antifreeze admixture for concrete: pat. US5296028A United States. Appl. No. US059395; filed 11.05.1993; publ. 22.03.1994. URL: <https://patents.google.com/patent/US5296028A/en>

57. Gargulak J. D., Bushar L. L., Sengupta A. K. Ammoxodized lignosulfonate cement dispersant: pat. US6238475B1 United States. Appl. No. US09/296093; filed 21.04.1999; publ. 29.05.2001. URL: <https://patents.google.com/patent/US6238475B1/en>

58. Jardine L. A., Koyata H., Folliard K. J., Ou C.–C., Jachimowicz F., Chun B.–W., Jeknavorian A. A., Hill C. L. Admixture and method for optimizing addition of EO/PO superplasticizer to concrete containing smectite clay–containing aggregates: pat. US6352952B1 United States. Appl. No. US09/446590; filed 19.06.1998; publ. 05.03.2002. URL: <https://patents.google.com/patent/US6352952B1/en>

59. Styron R. W. Fly ash composition for use in concrete mix: pat. US6482258B2 United States. Appl. No. US09/888691; filed 25.06.2001; publ. 19.11.2002. URL: <https://patents.google.com/patent/US6482258B2/en>

60. Lane D. R., Melendez J. A. Retarding admixture for concrete: patent application US20040072928A1 United States. Appl. No. US10/269764; filed 15.10.2002; publ. 15.04.2004. URL: <https://patents.google.com/patent/US20040072928A1/en>

61. Choi B.–G., Kang D.–K., Park K.–M., Song J.–K., Lee C.–Y., Song H.–B., Lee C.–Y., No D.–D., Kim D.–J. Cement admixture having superior water–reducing properties and method for preparing the same: patent application

US20040118324A1 United States. Appl. No. US10/732496; filed 10.12.2003; publ. 24.06.2004. URL: <https://patents.google.com/patent/US20040118324A1/en>

62. Shimanovich S. A. Chemical admixture for cementitious compositions: patent application US20060180052A1 United States. Appl. No. US11/283561; filed 18.11.2005; publ. 17.08.2006. URL: <https://patents.google.com/patent/US20060180052A1/en>

63. Tsai T. Concrete admixture additive: pat. US7312291B2 United States. Appl. No. US10/656525; filed 04.09.2003; publ. 25.12.2007. URL: <https://patents.google.com/patent/US7312291B2/en>

64. Juarez N. F. T. Composition for polymeric concrete: patent application US20080153942A1 United States. Appl. No. US11/950466; filed 05.12.2007; publ. 26.06.2008. URL: <https://patents.google.com/patent/US20080153942A1/en>

65. Izumi T., Zanders C., Jansen–Bockting M., Dikty S. Concrete and mortar admixture: patent application US20090234046A1 United States. Appl. No. US11/921184; filed 27.04.2006; publ. 17.09.2009. URL: <https://patents.google.com/patent/US20090234046A1/en>

66. Szwabowski J., Gołaszewski J. Technologia betonu samozagęszczalnego. Kraków: Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2010. 160 s.

67. The Cement Sustainability Initiative. Recycling Concrete. Geneva: World Business Council for Sustainable Development, 2009. 42 p. URL: <https://docs.wbcsd.org/2009/07/CSI–RecyclingConcrete–FullReport.pdf>

68. NIST. CEMHYD3D: The Cement Hydration and Degradation Modeling Software. URL: <https://www.nist.gov/services-resources/software/cemhyd3d>

69. Crow J. M. The concrete conundrum. *Chemistry World*. 2008. Vol. 5, No. 3. P. 62–66. URL: [https://www.rsc.org/images/Construction\\_tcm18-114530.pdf](https://www.rsc.org/images/Construction_tcm18-114530.pdf)

70. Krivenko P., Petropavlovskiy O., Vozniuk H., Lakusta S. The development of alkali-activated cement mixtures for fast rehabilitation and strengthening of concrete structures. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 195. P. 142–

146. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.536. URL:  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.536>

71. Rao N. V., Rajasekhar M., Vijayalakshmi K., Vamshykrishna M. The future of civil engineering with the influence and impact of nanotechnology on properties of materials. *Procedia Materials Science*. 2015. Vol. 10. P. 111–115. DOI: 10.1016/j.mspro.2015.06.032. URL:  
<https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.06.032>

72. Sanytsky M., Marushchak U., Chemerys M., Sanakevych E. The influence of complex modifiers on Portland cement hydration and hardening. *Current Issues of Civil and Environmental Engineering: proceedings of the IX International Scientific Conference, Rzeszów, 2004*. P. 349–355.

73. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2018. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2018. 200 p. URL:  
<https://apps.usgs.gov/minerals-information-archives/mcs/mcs2018.pdf>

74. Yamada K., Takahashi T., Hanehara S., Matsuhisa M. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer. *Cement and Concrete Research*. 2000. Vol. 30, No. 2. P. 197–207. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00230-6. URL: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00230-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00230-6)

75. Jo B.-W., Chakraborty S., Kim K. H., Lee Y. S. Effectiveness of the top-down nanotechnology in the production of ultrafine cement (~220 nm). *Journal of Nanomaterials*. 2014. Vol. 2014. Article ID 131627. 9 p. DOI: 10.1155/2014/131627. URL: <https://doi.org/10.1155/2014/131627>.

76. Thomas J. J., Jennings H. M., Chen J. J. Influence of nucleation seeding on the hydration mechanisms of tricalcium silicate and cement. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2009. Vol. 113, No. 11. P. 4327–4334. DOI: 10.1021/jp809811w. URL: <https://doi.org/10.1021/jp809811w>

77. Van Breugel K. Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials: PhD thesis. Delft: Delft University of Technology, 1991. 295 p.

78. Lothenbach B., Matschei T., Möschner G., Glasser F. P. Thermodynamic modelling of the effect of temperature on the hydration and porosity of Portland cement. *Cement and Concrete Research*. 2008. Vol. 38, No. 1. P. 1–18. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.08.017. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.017>.

79. Xu D., Tang J., Hu X., Yu C., Han F., Sun S., Deng W., Liu J. The influence of curing regimes on hydration, microstructure and compressive strength of ultra-high performance concrete: a review. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 76. Article 107401. DOI: 10.1016/j.job.2023.107401. URL: <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107401>

80. Von Werder J., Simon S., Gardei A., Fontana P., Meng B. Thermal and hydrothermal treatment of UHPC: influence of the process parameters on the phase composition of ultra-high performance concrete. *Materials and Structures*. 2021. Vol. 54. Article 44. DOI: 10.1617/s11527-021-01633-w. URL: <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01633-w>.

81. Scrivener K. L., John V. M., Gartner E. M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114. P. 2–26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>

82. Neville A. M. *Properties of Concrete*. 5th ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2011. 846 p. ISBN 978-0-273-75580-7.

83. Mindess S. *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*. 2nd ed. Duxford: Woodhead Publishing, 2019. DOI: 10.1016/C2017-0-04221-3. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780081026168/developments-in-the-formulation-and-reinforcement-of-concrete>.

84. Staquet S., Aggelis D. G., editors. *Early Age Cracking and Serviceability in Cement-Based Materials and Structures*: proceedings of the 2nd

International RILEM/COST Conference, Brussels, 12–14 September 2017. Paris: RILEM Publications, 2017. Vol. 1. 494 p. ISBN 978–2–35158–199–5.

85. Shah S. P., Weiss W. J., Yang W. Shrinkage cracking – can it be prevented? *Concrete International*. 1998. Vol. 20, No. 4. P. 51–55. URL: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?ID=132&m=details>.

86. Lothenbach B., Scrivener K., Hooton R. D. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41, No. 12. P. 1244–1256. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.12.001. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>.

87. Gartner E., Sui T. Alternative cement clinkers. *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114. P. 27–39. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.02.002. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.002>

88. Provis J. L., Van Deventer J. S. J., editors. *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224–AAM*. Dordrecht: Springer, 2014. DOI: 10.1007/978–94–007–7672–2. URL: <https://doi.org/10.1007/978–94–007–7672–2>.

89. Shi C., Roy D., Krivenko P. *Alkali-Activated Cements and Concretes*. London; New York: Taylor & Francis, 2006. 376 p. DOI: 10.1201/9781482266900. URL: <https://doi.org/10.1201/9781482266900>

90. Shi C., Fernández–Jiménez A., Palomo A. New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41, No. 7. P. 750–763. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.03.016. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>.

91. Taylor H. F. W. *Cement Chemistry*. 2nd ed. London: Thomas Telford Publishing, 1997. 480 p. DOI: 10.1680/cc.25929. URL: <https://doi.org/10.1680/cc.25929>.

92. Thomas J. J., Biernacki J. J., Bullard J. W., Bishnoi S., Dolado J. S., Scherer G. W., Luttge A. Modeling and simulation of cement hydration kinetics and microstructure development. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41, No. 12.

P. 1257–1278. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.10.004. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.10.004>.

93. Bishnoi S., Scrivener K. L.  $\mu$ ic: A new platform for modelling the hydration of cements. *Cement and Concrete Research*. 2009. Vol. 39, No. 4. P. 266–274. DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.12.002. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.12.002>.

94. Ye G., van Breugel K. Simulation of connectivity of capillary porosity in hardening cement-based systems made of blended materials. *HERON*. 2009. Vol. 54, No. 2/3. P. 163–184. URL: <https://www.heronjournal.nl/54-23/4.pdf>.

95. Zhang M. H., Li H. Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement. *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25, No. 2. P. 608–616. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.032. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.032>.

96. Maekawa K., Ishida T., Kishi T. Multi-Scale Modeling of Structural Concrete. London; New York: CRC Press, Taylor & Francis, 2008. DOI: 10.1201/9781482288599. URL: <https://doi.org/10.1201/9781482288599>.

97. Hager I. Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. 2013. Vol. 61, No. 1. P. 145–154. URL: <https://journals.pan.pl/Content/83679>.

98. Mindeguia J.-C., Pimienta P., Noumowé A., Kanema M. Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature – experimental and numerical discussion on spalling risk. *Cement and Concrete Research*. 2010. Vol. 40, No. 3. P. 477–487. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.10.011. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.011>.

99. Li Z. Advanced Concrete Technology. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. 528 p. DOI: 10.1002/9780470950067. URL: <https://doi.org/10.1002/9780470950067>.

100. Plank J., Sakai E., Miao C. W., Yu C., Hong J. X. Chemical admixtures – chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability.

*Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 78. P. 81–99. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.05.016. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.016>.

101. Marchon D., Flatt R. J. Impact of chemical admixtures on cement hydration. *Science and Technology of Concrete Admixtures* / ed. by P.–C. Aïtcin, R. J. Flatt. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. P. 279–304. DOI: 10.1016/B978–0–08–100693–1.00012–6. URL: <https://doi.org/10.1016/B978–0–08–100693–1.00012–6>.

102. Aïtcin P.–C., Flatt R. J., editors. *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. 666 p. ISBN 978–0–08–100693–1. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780081006931/science-and-technology-of-concrete-admixtures>.

103. Metaxa Z. S. Nanomaterials in cementitious composites: an update. *Molecules*. 2021. Vol. 26, No. 5. Article 1430. DOI: 10.3390/molecules26051430. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules26051430>.

104. Wang L., Zheng D., Zhang S., Cui H., Li D. Effect of nano–SiO<sub>2</sub> on the hydration and microstructure of Portland cement. *Nanomaterials*. 2016. Vol. 6, No. 12. Article 241. DOI: 10.3390/nano6120241. URL: <https://doi.org/10.3390/nano6120241>.

105. Norhasri M. S. M., Hamidah M. S., Fadzil A. M. Applications of using nano material in concrete: a review. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 133. P. 91–97. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.005. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.005>.

106. Graybeal B. A. Properties and Behavior of UHPC–Class Materials. McLean, VA: Federal Highway Administration, 2018. Report No. FHWA–HRT–18–036. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/18036/18036.pdf>.

107. Wille K., Naaman A. E., Parra–Montesinos G. J. Ultra–high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): a

simpler way. *ACI Materials Journal*. 2011. Vol. 108, No. 1. P. 46–54. DOI: 10.14359/51664215. URL: <https://doi.org/10.14359/51664215>.

108. Yoo D.–Y., Banthia N. Mechanical properties of ultra–high–performance fiber–reinforced concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 73. P. 267–280. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001>.

109. Yazıcı H. The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures. *Building and Environment*. 2007. Vol. 42, No. 5. P. 2083–2089. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.03.013. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.013>.

110. Lura P., Jensen O. M., van Breugel K. Autogenous shrinkage in high–performance cement paste: an evaluation of basic mechanisms. *Cement and Concrete Research*. 2003. Vol. 33, No. 2. P. 223–232. DOI: 10.1016/S0008–8846(02)00890–6. URL: [https://doi.org/10.1016/S0008–8846\(02\)00890–6](https://doi.org/10.1016/S0008–8846(02)00890–6).

111. Snellings R., Chwast J., Cizer Ö. та ін. RILEM TC–238 SCM recommendation on hydration stoppage by solvent exchange for the study of hydrate assemblages. *Materials and Structures*. 2018. Vol. 51. Article 172. DOI: 10.1617/s11527–018–1298–5. URL: <https://doi.org/10.1617/s11527–018–1298–5>.

112. Villagrán–Zaccardi Y. A., Vollpracht A., Gruyaert E. та ін. Recommendation of RILEM TC 238–SCM: determination of the degree of reaction of siliceous fly ash and slag in hydrated cement paste by the selective dissolution method. *Materials and Structures*. 2018. Vol. 51. Article 27. DOI: 10.1617/s11527–017–1134–3. URL: <https://doi.org/10.1617/s11527–017–1134–3>.

113. ДСТУ EN 206:2022. Бетон. Специфікація, продуктивність, виробництво та відповідність (EN 206:2013+A2:2021, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc–page.html?id\\_doc=106719](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc–page.html?id_doc=106719).

114. ДСТУ Б EN 197–1:2015. Цемент. Частина 1. Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів (EN 197–1:2011, IDT). Київ:

Мінрегіон України, 2015. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=63734](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=63734).

115. Яківчук С. В. Дослідження теплових та масообмінних процесів під час твердіння бетонів. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2026. Vol. 361, No. 1. P. 490–495. DOI: 10.31891/2307–5732–2026–361–68. URL: <https://doi.org/10.31891/2307–5732–2026–361–68>.

116. Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Макаренко Р. М. Високоміцні бетони: навч. посіб. Рівне: НУВГП, 2022. 216 с. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/26297/1/Високоміцні%20бетони%20зах.pdf>

117. Scrivener K., Snellings R., Lothenbach B., editors. *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. Boca Raton: CRC Press, 2016. DOI: 10.1201/b19074. URL: <https://doi.org/10.1201/b19074>

118. Lura P., van Breugel K. Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*. 2001. Vol. 31, No. 12. P. 1867–1872. DOI: 10.1016/S0008–8846(01)00601–9. URL: [https://doi.org/10.1016/S0008–8846\(01\)00601–9](https://doi.org/10.1016/S0008–8846(01)00601–9).

119. Bentz D. P. Three-dimensional computer simulation of Portland cement hydration and microstructure development. *Journal of the American Ceramic Society*. 1997. Vol. 80, No. 1. P. 3–21. DOI: 10.1111/j.1151–2916.1997.tb02785.x. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1151–2916.1997.tb02785.x>

120. Thomas M. D. A. *Supplementary Cementing Materials in Concrete*. Boca Raton: CRC Press, 2013. URL: <https://www.routledge.com/Supplementary–Cementing–Materials–in–Concrete/Thomas/p/book/9781138075658>

121. Bullard J. W., Jennings H. M., Livingston R. A., Nonat A., Scherer G. W., Schweitzer J. S., Scrivener K. L., Thomas J. J. Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41, No. 12. P. 1208–1223. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.09.011. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.011>.

122. Popovics S. *Concrete Materials: Properties, Specifications and Testing*. 2nd ed. Park Ridge, NJ: Noyes Publications, 1992. 661 p.

123. Яківчук С. Дослідження теплових та масообмінних процесів під час твердіння бетонів. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2026. Т. 361, № 1. С. 490–495. DOI: 10.31891/2307–5732–2026–361–68 URL:

<https://heraldts.khmnu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/1776/2387>

124. Швець Л. В., Яківчук С. В. Оцінка максимальної температури, досягнутої під час твердіння бетону. Вібрації в техніці та технологіях. 2023. № 4 (111). С. 88–93. DOI: 10.37128/2306–8744–2023–4–12 URL:

<http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/35816.pdf>

125. Швець Л. В., Яківчук С. В. Термосилова технологія бетонів нового покоління. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2022. № 4 (119). С. 96–101. DOI: 10.37128/2520–6168–2022–4–12 URL:

<http://tetapk.vsau.org/storage/articles/January2023/6zY0RZRC8ABwXCJdMEkf.pdf>

126. Дудар І. Н., Гарнага В. Л., Яківчук С.В. Пакетна термосилова установка. Пат. 97265 Україна : МПК В30В 11/02. № u201408738 ; заявл. 01.08.2014 ; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 5.

127. Дудар І. Н., Гарнага В. Л., Яківчук С.В. Пакетна термосилова установка з комбінованою геліотехнологією. Пат. 106340 Україна : МПК В30В 11/00. № u201509799 ; заявл. 09.10.2015 ; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8.

128. Гарнага В. Л., Яківчук С.В. Пакетна термосилова установка з енергетичним комплексом. Пат. 107582 Україна : МПК В30В 11/00. № u201600068 ; заявл. 04.01.2016 ; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 11.

129. Гарнага В. Л., Яківчук С.В. Пакетна термосилова установка із термосом. Пат. 123922 Україна : МПК В30В 11/00. № u201710087 ; заявл. 18.10.2017 ; опубл. 12.03.2018, Бюл. № 5.

## **ДОДАТКИ**

## Додаток А



# License Agreement



5.6



## COMSOL Software License Agreement

CAREFULLY READ THE TERMS AND CONDITIONS BELOW AND IN ANY APPLICABLE ADDENDUM (HEREINAFTER, "TERMS AND CONDITIONS") BEFORE INSTALLING OR USING THE PROGRAMS OR DOCUMENTATION. YOUR RIGHT TO USE ANY PROGRAMS AND DOCUMENTATION IS CONDITIONED ON ACCEPTANCE OF, AND COMPLIANCE WITH, THESE TERMS AND CONDITIONS. INSTALLING OR USING THE PROGRAMS MEANS YOU HAVE ACCEPTED THE TERMS AND CONDITIONS. IF YOU DO NOT ACCEPT THE TERMS AND CONDITIONS, RETURN THE PROGRAMS AND RELATED MATERIAL UNUSED TO YOUR VENDOR FOR A REFUND OR CEASE ANY AND ALL ATTEMPTS TO DOWNLOAD AND INSTALL THE PROGRAMS AND DELETE ANY MATERIAL DOWNLOADED. ANY THIRD PARTY HIRED TO INSTALL THE PROGRAMS ON BEHALF OF THE PURCHASER OF A LICENSE THERETO WHO CLICKS HIS/HER ACCEPTANCE OF THESE TERMS AND CONDITIONS UPON INSTALLATION HEREBY REPRESENTS AND WARRANTS THAT HE/SHE IS AUTHORIZED BY THE PURCHASER OF THE LICENSE TO ACCEPT SUCH TERMS AND CONDITIONS ON THE PURCHASER'S BEHALF.

- l** Definitions. The following words and phrases shall have the definitions set forth below throughout this Agreement, regardless of whether or not such words or phrases are capitalized:
- a** The term "Academic Prices" shall mean the price for which we sell licenses to the Programs to Institutions after applying our educational discount for usage of the Programs that meets the requirements of the Academic Addendum to this Agreement.
  - b** The term "Agreement" shall mean the terms and conditions contained in this document, delivered upon installation of the Programs.
  - c** The term "Affiliate" shall mean a legal entity having a relationship with a second legal entity such that the two entities are under common control.
  - d** The term "Application" shall mean (i) the output that is produced by using the Application Builder feature of the Programs (with or without modification using the COMSOL API) or (ii) the output that is produced by using the COMSOL API to enable interoperability between a Model and an external user interface.
  - e** The term "ASL" shall mean an academic server license for the Programs having the rights set forth in Section 4 of the Academic Addendum.
  - f** The term "CKL" shall mean a class kit license for the Programs having the rights set forth in Section 3 of the Academic Addendum.
  - g** The term "Compiled Application" shall mean the output produced by using the COMSOL Compiler, including the runtime libraries supporting such Applications when compiled.
  - h** The term "COMSOL API" shall mean the set of commands constituting the Programs' application programming interface, which the Programs will accept when input from a Java program, from a Visual Basic for Applications program

3

## COMSOL Software License Agreement

© 1998-2025 COMSOL

Protected by patents listed on [www.comsol.com/patents](http://www.comsol.com/patents), and U.S. Patents 7,519,518; 7,596,474; 7,623,991; 8,219,373; 8,457,932; 8,626,475; 8,949,089; 8,954,302; 9,098,106; 9,146,652; 9,208,270; 9,323,503; 9,372,673; 9,454,625; 10,019,544; 10,650,177; and 10,776,541. Patents pending.

This Documentation and the Programs described herein are furnished under the COMSOL Software License Agreement ([www.comsol.com/comsol-license-agreement](http://www.comsol.com/comsol-license-agreement)) and may be used or copied only under the terms of the license agreement. Portions of this software are owned by Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. © 1986-2020. All Rights Reserved. Portions of this software are owned by Spatial Corp. © 1989-2020. All Rights Reserved.

COMSOL, the COMSOL logo, COMSOL Multiphysics, COMSOL Desktop, COMSOL Compiler, COMSOL Server, and LiveLink are either registered trademarks or trademarks of COMSOL AB. AutoDesk, AutoCAD, Inventor and Revit are registered trademarks or trademarks of Autodesk, Inc., and/or its subsidiaries and/or affiliates in the USA and/or other countries. Solid Edge is a registered trademark of Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. or its subsidiaries in the United States and in other countries. SOLIDWORKS is a registered trademark of Dassault Systèmes SolidWorks Corp., PTC, Creo, Creo Parametric and Pro/ENGINEER are trademarks or registered trademarks of PTC, Inc. or its subsidiaries in the U.S. and in other countries. All other trademarks are the property of their respective owners, and COMSOL AB and its subsidiaries and products are not affiliated with, endorsed by, sponsored by, or supported by those or the above non-COMSOL trademark owners. For a list of such trademark owners, see [www.comsol.com/trademarks](http://www.comsol.com/trademarks).

Version: COMSOL 5.6

## Contact Information

Visit the Contact COMSOL page at [www.comsol.com/contact](http://www.comsol.com/contact) to submit general inquiries, contact Technical Support, or search for an address and phone number. You can also visit the Worldwide Sales Offices page at [www.comsol.com/contact/offices](http://www.comsol.com/contact/offices) for address and contact information.

If you need to contact Support, an online request form is located at the COMSOL Access page at [www.comsol.com/support/case](http://www.comsol.com/support/case). Other useful links include:

- Support Center: [www.comsol.com/support](http://www.comsol.com/support)
- Product Download: [www.comsol.com/product-download](http://www.comsol.com/product-download)
- Product Updates: [www.comsol.com/support/updates](http://www.comsol.com/support/updates)
- COMSOL Blog: [www.comsol.com/blogs](http://www.comsol.com/blogs)
- Discussion Forum: [www.comsol.com/community](http://www.comsol.com/community)
- Events: [www.comsol.com/events](http://www.comsol.com/events)
- Video Tutorials: [www.comsol.com/video](http://www.comsol.com/video)
- Support Knowledge Base: [www.comsol.com/support/knowledgebase](http://www.comsol.com/support/knowledgebase)

Part number: CM010005

with LiveLink™ for Excel®, or from a MATLAB® program with LiveLink™ for MATLAB® or LiveLink™ for Simulink®, and which enables Model creation or customization of the elements of a Model or Application that are exposed for end use and the addition of functionality.

- i** The term "COMSOL Client License Agreement" shall mean the electronic end-user license agreement from us that is displayed automatically when you install the COMSOL Client software.
- j** The term "COMSOL Runtime License Agreement" shall mean the electronic end-user license agreement from us that is displayed automatically the first time a user uses a Compiled Application.
- k** The term "COMSOL Server License Agreement" shall mean the electronic end-user license agreement from us that is displayed automatically when you install COMSOL Server.
- l** The term "Confidential Information" shall mean: (i) with respect to our information and information of our suppliers, the Programs, together with any other non-public information learned in connection therewith that should reasonably be considered confidential under the circumstances; (ii) with respect to your information, any and all information and files submitted to us through the web page <https://secure.comsol.com/support/confidential> or, in the case of items subject to U.S. export control restrictions, to [us-export-control@us.comsol.com](mailto:us-export-control@us.comsol.com), that derives actual or potential economic value from being kept confidential.
- m** The term "Control" shall mean a relationship between one legal entity and a second legal entity whereby (a) the first entity owns a majority percentage of the voting shares of stock of the second entity, (b) the first entity is a shareholder or member of the second entity and has the right to appoint or remove a majority of the board of directors of the second entity, or (c) the first entity is a shareholder or member of the second entity and has the right, pursuant to agreement, to exercise or direct the exercise of a majority percentage of the voting rights in the second entity.
- n** The term "CPU" shall mean a CPU-locked single user license for the Programs having the rights set forth in Section 2(h)(ii).
- o** The term "CSL" shall mean a server license for the Programs having the rights set forth in Section 2(h)(iv).
- p** The term "Documentation" shall mean all instruction manuals, user guides, operating guides, and other reference materials, including Examples, accompanying the Programs or published by us on [www.comsol.com](http://www.comsol.com) for use with the Programs.
- q** The term "Examples" shall mean samples provided by us for use with the Programs, which we provide either with the Programs in the "applications" and "demo" folders of the directory for your installation of the Programs or through the Application Gallery at [www.comsol.com](http://www.comsol.com) or through the Application Library

4

## Додаток Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор  
Вінницького  
національного аграрного  
університету


Григорій КАЛЕТНИК  
« 4 » березня 2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

КП « АГЕНЦІЯ ПРОСТОРОВОГО  
РОЗВИТКУ »


Назар КОВАЛЕНКО  
« 4 » березня 2026 р.

АКТ

**впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня  
доктора філософії**

Яківчука С.В. на тему: «Підвищення енергетичної ефективності термосилової технології високоміцних бетонів з використанням сонячної енергії» на КП «Агенція просторового розвитку» ( м. Вінниця, 21050, вул. Магістратська, 80).

Ми, що нижче підписалися, представники КП «Агенція просторового розвитку» директор Коваленко Н.В. і заступник директора Кравчук М.А. та представники Вінницького національного аграрного університету (ВНАУ), склали цей акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Яківчука С.В.


Мета роботи полягає у науковому обґрунтуванні та розробці заходів з підвищення енергоефективності термосилової технології виготовлення високоміцних бетонів з використанням сонячної енергії, що забезпечує покращення фізико-механічних властивостей матеріалу при зниженні енерговитрат.

У дисертаційній роботі Яківчука С. В. отримано результати, що полягають в розробці технології отримання бетонів із використанням комплексу фізичних впливів, що мають на меті отримання бетонів із високими фізико-механічними та економічними характеристиками. Запропоновані енергоощадні режими можуть бути інтегровані у виробничі лінії, а визначені оптимальні параметри процесу забезпечують отримання бетонів із підвищеними фізико-механічними характеристиками, що розширює сферу їх застосування та спрямоване на вирішення науково-прикладних задач із проектування якісної продукції на підприємстві КП «Агенція просторового розвитку».

**Продовження додатку Б**

Технічна документація з підвищення енергетичної ефективності термосилової технології високоміцних бетонів з використанням сонячної енергії та результатів комп'ютерного моделювання прийнята КП «Агенція просторового розвитку» для використання при проєктуванні та впровадженні технологічних процесів виготовлення бетонних виробів.

Дисертаційна робота Яківчука С.В. спрямована на вирішення актуальної науково-технічної проблеми розробки та впровадження ресурсозберігаючих технологій виготовлення високоміцних бетонів.

Представники ВНАУ:  
Науковий керівник, к.т.н., доцент  
 Людмила ШВЕЦЬ

Аспірант кафедри АІ та ТС  
 Сергій ЯКІВЧУК



Директор  
КП « АГЕНЦІЯ ПРОСТОРОВОГО  
РОЗВИТКУ»  
Назар КОВАЛЕНКО

Заступник директора  
КП « АГЕНЦІЯ ПРОСТОРОВОГО  
РОЗВИТКУ»  
Максим КРАВЧУК

## Додаток В

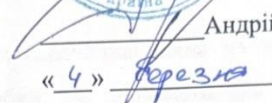
ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор  
національного аграрного  
університету

 Григорій КАЛЕТНИК  
 « 4 » березня 2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

ПРИВАТНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
«ЛАДОГА 77»

 Андрій ГРИНЬ  
 « 4 » березня 2026 р.

## АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня  
доктора філософії

Яківчука С.В. на тему: «Підвищення енергетичної ефективності термосилової технології високоміцних бетонів з використанням сонячної енергії» на ПП «Ладога 77» (21037, Вінницька обл., Вінниця, вул. Пирогова, буд. 119).

Ми, що нижче підписалися, представники ПП «Ладога 77» директор Гринь А.В. і заступник директора Гринь М.А. та представники Вінницького національного аграрного університету (ВНАУ), склали цей акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Яківчука С.В.

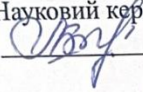
Мета роботи полягає у науковому обґрунтуванні та розробці заходів з підвищення енергоефективності термосилової технології виготовлення високоміцних бетонів з використанням сонячної енергії, що забезпечує покращення фізико-механічних властивостей матеріалу при зниженні енерговитрат.

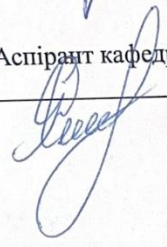
У дисертаційній роботі Яківчука С. В. отримано результати, що полягають в розробці технології отримання бетонів із використанням комплексу фізичних впливів, що мають на меті отримання бетонів із високими фізико-механічними та економічними характеристиками. Запропоновані енергоощадні режими можуть бути інтегровані у виробничі лінії, а визначені оптимальні параметри процесу забезпечують отримання бетонів із підвищеними фізико-механічними характеристиками, що розширює сферу їх застосування та спрямоване на вирішення науково-прикладних задач із виготовлення якісної продукції на підприємстві ПП «Ладога 77».


Технічна документація з підвищення енергетичної ефективності термосилової технології високоміцних бетонів з використанням сонячної енергії та результатів комп'ютерного моделювання прийнята ПП «Ладога 77» для використання при проектуванні та впровадженні технологічних процесів виготовлення бетонних виробів.


Дисертаційна робота Яківчука С.В. спрямована на вирішення актуальної науково-технічної проблеми розробки та впровадження ресурсозберігаючих технологій виготовлення високоміцних бетонів.

Представники ВНАУ:

Науковий керівник, к.т.н., доцент  
 Людмила ШВЕЦЬ

Аспірант кафедри АІ та ТС  
 Сергій ЯКІВЧУК

  
Директор  
ПРИВАТНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ЛАДОГА  
77»

 Андрій ГРИНЬ

Заступник директора  
ПРИВАТНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ЛАДОГА  
77»

 Микола ГРИНЬ

### Додаток Г

#### Адекватність регресійних моделей за критерієм Фішера

1. Кількість дослідів:

$$N=18$$

2. Кількість коефіцієнтів регресії:

$$l=10$$

3. Кількість повторних дослідів:

$$m=3$$

4. Сума квадратів відхилень:

$$S_{ad}^2 = \frac{m}{N-l} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2$$

$$\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2 = 1,92$$

5. Розрахунок дисперсії адекватності виконується за формулою:

$$S^2 = \frac{3}{18-10} 1,92 = 0,72$$

6. Дисперсія відтворюваності за результатами повторних експериментів:

$$S_{2y}^2 = 0,46$$

7. Розрахунок критерію Фішера визначався за залежністю:

$$F = \frac{S_{2ad}}{S_{2y}}$$

8. Підставляємо значення:

$$F = \frac{0,72}{0,46}$$

$$F = 1,57$$

9. Табличне значення критерію Фішера:

$$f_1 = N - l = 8$$

$$f_2 = N(m-1) = 36$$

10. Табличне значення становить:

$$F_{\text{табл}} = 2,42$$

11. Перевірка адекватності:

$$F_{\text{розр}} = 1,57 < F_{\text{табл}} = 2,42$$

## Додаток Д

**СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**  
за спеціальністю 132 Матеріалознавство  
**Яківчука Сергій Володимировича**

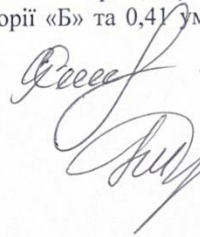
№ п/п	Назва	Назва видання та його вихідні відомості, що дозволяють ідентифікувати та відрізнити це видання від інших	Кількість друкова-них сторінок / др. арк.	Співавтори
1	2	3	4	5
<b>Статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б», включених до міжнародної наукометричної бази даних (Index Copernicus)</b>				
1.	Використання сонячної енергії для термосилової обробки бетону методом термосу	<i>Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві.</i> 2016. Т. 20, № 1. URL: <a href="https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/443">https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/443</a>	<u>C. 27–30</u> 0,28(0,2)	Дудар І. Н., Друкований М. Ф., Гарнага В. Л.
2.	ТВО бетонних виробів із використанням сонячної енергії і тиску	<i>Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві.</i> 2017. Т. 22, № 1. URL: <a href="https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/494">https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/494</a>	<u>C. 11–16</u> 0,38(0,12)	Дудар І. Н., Гарнага В. Л.
3.	Термосилова технологія бетонів нового покоління	<i>Техніка, енергетика, транспорт АПК.</i> 2022. № 4 (119). С. 96–101. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-4-12. URL: <a href="http://tetapk.vsau.org/storage/articles/January2023/6zY0RZRC8ABwXCJdMEkf.pdf">http://tetapk.vsau.org/storage/articles/January2023/6zY0RZRC8ABwXCJdMEkf.pdf</a>	<u>C. 96-101</u> 0,51 (0,26)	Швець Л.В., Яківчук С.В.
4.	Оцінка максимальної температури, досягнутої під час твердіння бетону	<i>Вібрації в техніці та технологіях.</i> 2023. № 4 (111). С. 88–93. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-4-12. URL: <a href="http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/35816.pdf">http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/35816.pdf</a>	<u>C. 88-93</u> 0,51 (0,26)	Швець Л.В., Яківчук С.В.
5.	Дослідження теплових та масообмінних процесів під час твердіння бетонів	<i>Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки.</i> 2026. Т. 361, № 1. DOI: 10.31891/2307-5732-2026-361. URL: <a href="https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361">https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361</a>	<u>C. 490-495</u> 0,60	Яківчук С.В.
<b>Інші видання (тези доповідей)</b>				
6.	Оцінка температур при термосилової обробці високоміцних бетонів.	<i>Recent Trends in Science:</i> матеріали II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, 04-05 травня 2023 року. Дніпро, 2022	<u>C. 311-312.</u> (0,10 друк. арк.)	–
7.	Термосилова технологія бетонів	<i>Future of Work: Technological, Generational and Social Shifts:</i> матеріали II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, м. Дніпро. 11-12 травня 2023 року.	<u>C. 199-200.</u> (0,10 друк. арк.)	–
8.	Сучасні інноваційні методи сталого виробництва бетонів нового покоління з використанням термосилової технології	<i>Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування:</i> матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції, м. Луцьк, 27–30 травня 2025 року.	<u>C. 184-186</u> 0,21	–

## Продовження додатку Д

Патенти та авторські свідоцтва			
9.	Пакетна термосилова установка	Пат. 97265 Україна : МПК В30В 11/02. № u201408738 ; заявл. 01.08.2014 ; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 5.	Дудар І. Н., Гарнага В. Л.
10.	Пакетна термосилова установка з комбінованою геліотехнологією	Пат. 106340 Україна : МПК В30В 11/00. № u201509799 ; заявл. 09.10.2015 ; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8.	Дудар І. Н., Гарнага В. Л.
11.	Пакетна термосилова установка з енергетичним комплексом	Пат. 107582 Україна : МПК В30В 11/00. № u201600068 ; заявл. 04.01.2016 ; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 11.	Гарнага В. Л.
12.	Пакетна термосилова установка із термосом	Пат. 123922 Україна : МПК В30В 11/00. № u201710087 ; заявл. 18.10.2017 ; опубл. 12.03.2018, Бюл. № 5.	Гарнага В. Л.

Усього за темою дисертаційної роботи «Підвищення енергетичної ефективності термосилової технології високоміцних бетонів з використанням сонячної енергії» опубліковано 12 наукових праць загальним обсягом 2,69 умов. друк. арк. ( власний доробок автора 1,85 умов. друк. арк) у тому числі 1,44 умов. друк.арк. у наукових фахових виданнях категорії «Б» та 0,41 умов. друк. арк. у збірниках тез доповідей.

Аспірант



Сергій ЯКІВЧУК

Вчений секретар

Тетяна КОРПАНЮК



2026 р.

## Додаток Е

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ НА НАУКОВО-ПРАКТИЧНИХ  
КОНФЕРЕНЦІЯХза спеціальністю 132 Матеріалознавство  
Яківчука Сергій Володимировича

№ п/п	Тема доповіді	Назва конференції, місце, дата проведення
Апробація результатів дисертації на науково-практичних конференціях		
1.	Термосилова технологія бетонів нового покоління	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні процеси агропромислової інженерії в умовах сталого розвитку: проблеми та перспективи». Вінниця. 20 – 21 жовтня 2022 року
2.	Оцінка максимальної температури, досягнутої під час твердіння бетону	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії у контексті євроінтеграції». Вінниця. 19 – 20 жовтня 2023 року
3.	Теплові та масообмінні процеси під час твердіння бетону	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії в контексті глобальних викликів». Вінниця. 17-18 жовтня 2024 р.
4.	Інноваційні підходи покращення процесу перебігу металу при гарячому деформуванні	Всеукраїнська науково-практична конференція «Сталий розвиток України в умовах європейської інтеграції: сучасний стан, шлях відновлення та перспективи». Вінниця, 15–16 травня 2025 року
5.	Інноваційні методи виробництва бетонів нового покоління з використанням альтернативних джерел енергії	Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні підходи агропромислової інженерії: проблеми та перспективи». Вінниця, 30–31 жовтня 2025 року
6.	Моделювання термосилової технології високоміцних бетонів	Всеукраїнська науково-практична конференція «Міждисциплінарні інновації та науково-технологічні рішення для сталого розвитку аграрної науки, економіки, освіти та суспільства» Вінниця, 14-15 травня 2026 року

Аспірант

Вчений секретар

М.П.

« \_\_\_\_\_ 2026 р.



Сергій ЯКІВЧУК

Тетяна КОРПАНИОК