

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ГОРЮН ОЛЕГ ОЛЕГОВИЧ

УДК 691.32; 666.97; 693.548.8

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДИФІКАЦІЯ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ ІЗ БЕТОНУ З
ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ТА УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ
ІМПУЛЬСНОГО ІМПРЕГНУВАННЯ**

Спеціальність 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Галузь знань 19 «Архітектура та будівництво»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ О. О. Горюн

Науковий керівник:

Коц Іван Васильович,
кандидат технічних наук, доцент

Вінниця — 2024

АНОТАЦІЯ

Горюн О. О. Модифікація будівельних виробів із бетону з використанням технології та устаткування для імпульсного імпрегнування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – «Будівництво та цивільна інженерія» галузь знань 19 – «Архітектура та будівництво» – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2024.

Дисертаційна робота присвячена питанням покращення фізико-механічних властивостей будівельних виробів із бетону, що мають капілярно-пористу будову, шляхом використання технології та устаткування для імпульсного імпрегнування.

Актуальність теми зумовлена необхідністю покращення фізико-механічних характеристик бетонних будівельних виробів, зокрема зниження водопоглинання, що сприяє підвищенню морозостійкості, а також збільшення показників міцності, оскільки традиційні методи їх обробки не забезпечують достатньої стійкості до агресивних умов експлуатації, вологи та морозу.

Модифікація будівельних виробів із бетону є важливим напрямком сучасних досліджень у галузі будівельного матеріалознавства. Відомо, що бетон є капілярно-пористим будівельним матеріалом і, незважаючи на свої позитивні властивості, такі як висока міцність і доступність, має ряд недоліків, зокрема, високі показники водопоглинання, низьку морозостійкість, низьку міцність на згин, а також підвищену чутливість до агресивних середовищ. Ці проблеми можуть призводити до передчасного руйнування конструкцій, збільшення витрат на їх обслуговування та скорочення терміну експлуатації.

Одним із перспективних шляхів подолання цих недоліків є імпрегнування бетону спеціальними технологічними рідинами, що дозволяє покращити його фізико-механічні властивості, зокрема, підвищити стійкість до вологи, морозу, агресивних хімічних впливів, підвищити міцнісні показники. Однак традиційні

методи імпрегнування мають обмеження щодо глибини проникнення та рівномірності розподілу рідини в структурі бетону, що знижує ефективність модифікації.

Впровадження технології імпульсного імпрегнування відкриває нові можливості для вдосконалення процесу обробки будівельних виробів. Імпульсний метод дозволяє досягати глибшого та більш рівномірного проникнення просочувальних складів у пористу структуру бетону, що значно підвищує якість обробки. Використання такого методу сприяє зменшенню часу обробки, збільшенню економічної ефективності та підвищенню експлуатаційних властивостей матеріалу. Дослідження, спрямовані на розробку та впровадження технології імпульсного імпрегнування для модифікації бетонних виробів, є надзвичайно актуальними з наукової та практичної точок зору. Вони відповідають сучасним вимогам до підвищення довговічності та надійності будівельних матеріалів, що дозволить розширити сферу їх застосування в різних експлуатаційних умовах.

Метою роботи є модифікація будівельних виробів із бетону для покращення фізико-механічних властивостей шляхом імпульсного імпрегнування їх капілярно-пористої структури.

Об'єктом дослідження є будівельні вироби з бетону, технології та устаткування імпрегнування для отримання покращених фізико-механічних та експлуатаційних властивостей виробів.

Предметом досліджень є дослідження фізико-механічних характеристик будівельних виробів із бетону з використанням технології та устаткування для імпульсного імпрегнування.

Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі сформовано й розв'язано низку наукових завдань, які відображено у п'яти розділах дисертації.

У першому розділі проведено дослідження структури будівельних матеріалів з бетону та визначено основні руйнівні чинники, що погіршують експлуатаційні характеристики бетонних виробів. Виконано аналітичний огляд відомих методів модифікації будівельних матеріалів капілярно-пористої будови,

зокрема огляд технологій імпрегнування будівельних матеріалів з бетону. Крім того, проаналізовано існуюче устаткування для реалізації методів імпрегнування будівельних матеріалів.

У другому розділі наведено основні характеристики матеріалів, які використовувалися для проведення експериментальних досліджень. Встановлено хімічний склад, основні властивості компонентів для виготовлення бетонних зразків. Наведено основні характеристики просочувальних композицій водного розчину метилсиліконату калію та рідкого натрієвого скла, які застосовували для імпрегнування. Наведено спосіб виготовлення і параметри дослідних зразків. Представлено принципову схему розробленого лабораторного стенду для імпрегнування бетону з переліком обладнання та контрольно-вимірювальних приладів. Детально описано методику проведення експериментальних досліджень. Здійснено стислий опис методів та обладнання для випробувань дослідних зразків у відповідності із стандартними методиками, а саме визначення показників водопоглинання, міцності на стиск, міцності на згин. Методом планування багатофакторного експерименту отримано квадратичні рівняння регресії, що описують залежності значень глибини проникнення просочувальної композиції від параметрів запропонованого устаткування для імпульсного імпрегнування (повного тиску рідини, частоти повторення імпульсів тиску) та динамічної в'язкості просочувальної композиції. Визначено, що при однакових умовах проведення, необхідно виконати 6 дослідів.

У третьому розділі визначено можливий вплив різних просочувальних композицій на формування фізико-механічних характеристик будівельних виробів із бетону. Проведено математичне моделювання процесів проникнення просочувальних композицій в капілярно-пористу структуру бетону, що протікають під час імпульсного імпрегнування. Встановлено основні параметри, які впливають на процес імпульсного імпрегнування бетону, в тому числі статичну та динамічну складові повного тиску просочувального складу. Отримано рівняння для капіляра або розімкнутої пори, а також для замкнутої

пори із затиснутим залишковим повітрям всередині, що відображають різницю тисків, спричинену застосуванням імпульсів тиску, яка зумовлює рух просочувальної композиції в об'єм бетонного зразка. Виявлено зв'язок між втратами тиску в капілярі на подолання сил опору, капілярним тиском і ударним тиском рідини.

Виконано математичне моделювання оцінювання технічного стану обладнання для імпульсного імпрегнування будівельних виробів із бетону у процесі його експлуатації. Побудовано поверхні функцій належності, які відображають залежність технічного стану устаткування для імпульсного імпрегнування виробів із бетону від параметрів процесу імпрегнування і можуть сприяти виявленню та діагностиці причини відхилень фактичних характеристик, які можуть виникати під час експлуатації обладнання.

У четвертому розділі проведено експериментальне дослідження процесу імпульсного імпрегнування будівельних виробів із бетону. Проведені експериментальні дослідження підтвердили гіпотезу щодо збільшення глибини проникнення просочувальних композицій внаслідок застосування способу імпульсного імпрегнування, яке генерує додаткову ударну пульсуючу складову тиску на стаціонарний потік просочувальної рідини. Експериментальний стенд апарату для імпульсного імпрегнування будівельних виробів з бетону, показав достатню працездатність та можливість регулювання параметрів устаткування (тиску, частоти повторюваності імпульсів тиску просочувальної композиції), вплив яких досліджувався при теоретичних дослідженнях.

Експериментальні дослідження проводились з використанням декількох методів модифікації будівельних матеріалів: відомого методу вакуум-тиск-вакуум (ВТВ) та запропонованого методу імпульсного імпрегнування. У результаті експериментальних досліджень були отримані та випробувані модифіковані дослідні бетонні зразки. Зібрані дані продемонстрували, що при застосуванні імпульсів тиску досягається збільшення глибини проникнення просочувальних композицій та ступеню заповнення оброблених зразків бетону. Це справляє позитивний ефект на фізико-механічні характеристики

модифікованих зразків. Водопоглинання зразків, які були імпрегновані гідрофобізуючим розчином на основі силікону запропонованим імпульсним способом, знизилися на 80,9% порівняно з контрольними зразками, які не підлягали обробці, а також на 56,7% відносно зразків, оброблених способом вакуум-тиск-вакуум. Міцність бетону на стиск, імпрегнованого рідким натрієвим склом імпульсним способом, збільшилася на 18,2% відносно зразків, оброблених способом ВТВ, а міцність на згин збільшилася на 34% відносно зразків, оброблених способом ВТВ.

У п'ятому розділі запропоновано нову ефективну технологію, що передбачає модифікацію будівельних виробів із бетону шляхом імпульсного імпрегнування та представлено технологічну схему процесу модифікації. В основу запропонованого способу обробки капілярно-пористих матеріалів покладено використання впливу імпульсів тиску, який забезпечує глибоке надходження та рівномірне розподілення просочувальних композицій в об'ємі бетону за рахунок створення і чергування імпульсів тиску просочувальної композиції. Вказаний спосіб дозволяє досягти рівномірної обробки бетону, підвищення довговічності та поліпшення експлуатаційних характеристик будівельних виробів із бетону, залежно від типу просочувальної композиції.

На підставі аналітичного огляду існуючих конструкцій обладнання для імпрегнування будівельних матеріалів із застосуванням тиску було розроблено і запропоновано нові конструкції прототипів устаткування для імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів та виробів, яке реалізовує запроповану технологію модифікування. Устаткування містить видозмінену просочувальну камеру, у порівнянні з відомими аналогами, а також є оснащеним додатковим обладнанням для генерації імпульсів тиску просочувальної композиції.

В ході розробки запропонованої установки було запропоновано декілька варіантів конструктивного виконання пристроїв для створення імпульсів тиску рідини, робота яких включає перекивання-відкривання трубопроводу з просочувальним складом. В результаті аналізу та досліджень було визначено їхні недоліки, які можуть впливати на якість роботи устаткування для імпрегнування

та його експлуатаційні характеристики. Ключовими з недоліків є виникнення значних механічних навантажень на рухомі елементи гідроімпульсного пристрою, що може призвести до зменшення терміну експлуатації обладнання, а також нестабільних імпульсів тиску рідини, зумовлені різким відкриванням-закриванням штоку. Враховуючи виявлені недоліки, розроблено принципову схему конструктивного виконання обладнання для імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів та виробів, оснащеного генератором імпульсів тиску, який представлений у вигляді гідравлічного розподільвача, просочувальної камери з встановленою мембраною, яка передає імпульси тиску від робочої рідини до просочувальної композиції, системою підігріву та іншими компонентами.

Крім того, у п'ятому розділі розкрито економічну ефективність використання запропонованої технології та устаткування для імпульсного імпрегнування будівельних виробів із бетону, де представлено розрахунки терміну окупості та економічної ефективності імпульсного імпрегнування бетонів. Визначено, що період окупності застосування даної технології та обладнання становить 2,8 років.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

Уперше:

- встановлено експериментальним шляхом, що внаслідок імпульсного імпрегнування зразків бетону розчином силікону, досягається зменшення водопоглинання з 7,12% до 1,36%;
- встановлено експериментальним шляхом, що внаслідок імпульсного імпрегнування зразків бетону рідким натрієвим склом, досягається збільшення показників міцності на стиск від 17,2 МПа до 29,9 МПа та міцності на згин від 3,3 МПа до 7,1 МПа;

Набуло подальшого розвитку:

- встановлення аналітичних залежностей, що пов'язують основні процеси, які відбуваються під час проникнення просочувальних композицій в будівельні матеріали капілярно-пористої будови шляхом

імпульсного імпрегнування;

Удосконалено:

- технологію для імпульсного імпрегнування, яка дозволяє інтенсифікувати процес просочення та збільшити проникність імпрегнуючого розчину у пористу структуру матеріалу яке забезпечує ефективне проведення процесу, а також збільшує продуктивність та скорочує час обробки матеріалів.

Практичне значення роботи полягає в тому що:

- розроблено нову технологію імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів та виробів;
- розроблено принципові та конструктивні схеми устаткування для імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів та виробів;
- розроблено технологічну схему модифікації будівельних виробів із бетону шляхом імпульсного імпрегнування просочувальними композиціями;
- результати дослідження впроваджено в навчальний процес підготовки бакалаврів Вінницького національного технічного університету, які навчаються за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія», у практичну діяльність Товариства з обмеженою відповідальністю «ВІННИЦЯБУД», у практичну діяльність Товариства з обмеженою відповідальністю «Грань», а також у практичну діяльність Хмельницької філії Державного підприємства Державного науково-дослідного та проектно-вишукувального інституту «НДПРОЕКТРЕКОНСТРУКЦІЯ», що підтверджується відповідними актами впровадження.

Ключові слова: будівельні матеріали та вироби, бетон і залізобетон, капілярно-пориста структура, імпрегнування, просочення, цикл заморожування-відтавання, дефекти та руйнування будівельних матеріалів, енергоефективність і ресурсозбереження, математичне моделювання, ресурсозберігаюча технологія модифікації, імпульси тиску рідини, гідроприводне устаткування, аеродромний та дорожній одяг, асфальто- та цементобетонні покриття, причини та фактори впливу.

ABSTRACT

Horiun O. O. Modification of building products of concrete using technology and equipment for impulse impregnation. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 192 – «Building and Civil Engineering», field of knowledge 19 – «Architecture and Construction» – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2024.

The dissertation is devoted to improving the physical and mechanical properties of construction concrete products with a capillary-porous structure by using technology and equipment for impulse impregnation.

The topicality of the theme is due to the need to improve the physical and mechanical characteristics of concrete construction products, in particular, reducing water absorption, which contributes to increasing frost resistance, as well as increasing strength indicators, since traditional methods of their processing do not provide sufficient resistance to aggressive operating conditions, moisture and frost.

Modification of construction concrete products is an important direction of modern research in the field of construction material science. The concrete is known as a capillary-porous building material and, despite its positive properties, such as high strength and availability, it has a number of disadvantages, in particular, high water absorption rates, low frost resistance, low bending strength, as well as increased sensitivity to aggressive environments. These problems can lead to the premature destruction of structures, increase the costs of their maintenance and shorten the service life.

One of the perspective ways to overcome these shortcomings is the impregnation of concrete with special technological liquids, which allows to improve its physical and mechanical properties, in particular, to increase resistance to moisture, frost, aggressive chemical influences, and to increase strength indicators. However, traditional methods of impregnation has limitations regarding the depth of penetration and uniformity of

liquid distribution in the concrete structure, which reduces the effectiveness of the modification.

The introduction of impulsed impregnation technology opens a new opportunities for improving the process of processing construction products. The impulse method allows to achieve a deeper and more uniform penetration of impregnating compounds into the porous structure of concrete, which significantly improves the quality of processing. Using of this method helps to reduce the processing time, increase the economic efficiency and increase the operational properties of the material. Research aimed at the development and implementation of impulse impregnation technology for the modification of concrete products is extremely relevant from a scientific and practical point of view. They meet modern requirements for increasing the durability and reliability of building materials, which will allow expanding the scope of their application in various operating conditions.

The purpose of the work is to modify construction concrete products for improve physical and mechanical properties by means of impulse impregnation of their capillary-porous structure.

The object of research is construction of concrete products, technologies and equipment of impregnation to obtain improved physical, mechanical and operational properties of products.

The subject of research is the study of physical and mechanical characteristics of construction concrete products using technology and equipment for impulsed impregnation.

To achieve the set goal, a number of scientific tasks were formed and solved in the dissertation work, which are reflected in five sections of the dissertation.

In the first section was conducted research of the structure of concrete building materials was conducted and the main destructive factors that worsen the operational characteristics of concrete products were determined. Analytical review of known methods of modification of building materials of capillary-porous structure, in particular review of technologies of impregnation of building materials made of

concrete, was performed. In addition, the existing equipment for the implementation of methods of impregnation of building materials was analyzed.

In the second section gives the main characteristics of the materials that were used for conducting experimental research. The chemical composition and main properties of the components for the concrete products samples have been established. The main characteristics of the impregnation compositions of an aqueous solution of potassium methylsiliconate and liquid sodium glass, which were used for impregnation, are presented. The manufacturing method and parameters of the experimental samples are given. A schematic diagram of the developed laboratory stand for concrete impregnation with a list of equipment and control and measuring devices is presented. The methodology of experimental research is described in detail. A brief description of the methods and equipment for testing the experimental samples in accordance with standard methods, namely the determination of water absorption, compressive strength, and bending strength. Quadratic regression equations were obtained using the method of planning a multifactorial experiment, which describe the dependence of the values of the depth of penetration of the impregnation composition on the parameters of the proposed equipment for impulse impregnation (full pressure of the liquid, the frequency of repetition of pressure pulses) and the dynamic viscosity of the impregnation composition. It was determined that under the same conditions of conduct, it is necessary to perform 6 experiments.

In the third section, the possible influence of various impregnation compositions on the formation of physical and mechanical characteristics of construction concrete products is determined. Mathematical modeling of the processes of penetration of impregnation compositions into the capillary-porous structure of concrete, which occur during pulsed impregnation, was carried out. The main parameters that affect the process of impulse impregnation of concrete, including the static and dynamic components of the full pressure of the impregnating composition, have been established. Equations are obtained for a capillary or open pore, as well as for a closed pore with trapped residual air inside, which reflect the pressure difference caused by the application of pressure pulses, which causes the movement of the impregnation

composition into the volume of the concrete sample. The connection between pressure losses in the capillary to overcome resistance forces, capillary pressure and shock pressure of the liquid was revealed.

Mathematical modeling of the assessment of the technical condition of the equipment for impulse impregnation of construction concrete products during its operation has been performed. The surfaces of the membership functions are constructed, which reflect the dependence of the technical condition of the equipment for impulse impregnation of concrete products on the parameters of the impregnation process and can contribute to the identification and diagnosis of the cause of deviations in the actual characteristics that may occur during the operation of the equipment.

In the fourth section, experimental studies of the process of impulse impregnation of construction concrete products is carried out. The conducted experimental studies confirmed the hypothesis of an increase in the depth of penetration of impregnating compositions as a result of the use of the impulse impregnation method, which generates an additional shock pulsating component of pressure on the stationary flow of the impregnating liquid. The experimental stand of the equipment for impulse impregnation of construction concrete products showed sufficient performance and the possibility of adjusting the equipment parameters (pressure, frequency of repetition of pressure pulses of the impregnation composition), the influence of which was studied during theoretical studies.

Experimental studies were carried out using several methods of modification of building materials: the well-known method of vacuum-pressure-vacuum (VTV) and the proposed method of impulse impregnation. As a result of experimental studies, modified test concrete samples were obtained and tested. The collected data showed that when applying pressure pulses, an increase in the penetration depth of the impregnation compositions and the degree of filling of the treated concrete samples is achieved. It has a positive effect on the physical and mechanical characteristics of the modified samples. The water absorption of samples which impregnated with a hydrophobizing solution based on silicone by the proposed impulse method decreased by 80% compared to control samples which were not subject to treatment, as well as

by 56.7% compared to samples treated by the vacuum-pressure-vacuum method. The compressive strength of concrete impregnated with liquid sodium glass by the impulse method increased by 18.2% compared to the samples treated by the VTV method, and the flexural strength increased by 34% compared to the samples treated by the VTV method.

In the fifth section, a new effective technology is proposed, which involves the modification of construction concrete products by impulse impregnation, and the technological scheme of the modification process is presented. The proposed method of processing capillary-porous materials is based on the use of pressure impulses, which ensures deep penetration and uniform distribution of impregnating compositions in the volume of concrete due to the creation and alternation of pressure pulses of the impregnating composition. This method makes it possible to achieve uniform processing of concrete, increase durability and improve operational characteristics of construction concrete products, depending on the type of impregnation composition.

On the basis of an analytical review of existing designs of equipment for impregnation of building materials using pressure, new construction of prototypes of equipment for impulse impregnation of building materials and products were developed and proposed, which implements the proposed modification technology. The equipment contains a modified impregnation chamber, in comparison with known analogues, and is also equipped with additional equipment for generating pressure impulses of the impregnation composition.

During the development of the proposed installation, several variants of the design of devices for creating liquid pressure pulses were proposed, the work of which includes closing and opening the pipeline with the impregnating composition. As a result of analysis and research, its shortcomings were determined, which can affect the quality of the impregnation equipment and its operational characteristics. The main disadvantages are the occurrence of significant mechanical loads on the moving elements of the hydraulic impulse device, which can lead to a decrease in the service life of the equipment, as well as unstable pulses of liquid pressure caused by sudden opening and closing of the stem. Taking into account the identified shortcomings, a

schematic design of the equipment for impulse impregnation of building materials and products was developed, equipped with a pressure impulse generator, which is presented in the form of a hydraulic distributor, an impregnation chamber with an installed membrane that transmits pressure impulses from the working fluid to the impregnation composition, a heating system and other components.

In addition, the fifth section revealed the economic efficiency of using the proposed technology and equipment for impulse impregnation of construction concrete products, where calculated of the payback period and the economic efficiency of impulse impregnation of concrete. It was determined that the payback period of using this technology and equipment is 2.8 years.

Scientific novelty of the results obtained:

For the first time:

- was established experimentally that as a result of impulse impregnation of concrete samples with a silicone solution, a decrease in water absorption from 7.12% to 1.36% is achieved;
- was established experimentally that as a result of impulse impregnation of concrete samples with liquid sodium glass, an increase in compressive strength from 17.2 MPa to 29.9 MPa and flexural strength from 3.3 MPa to 7.1 MPa is achieved;

Further developed:

- establishing analytical dependencies and connecting the main processes that occur during the penetration of impregnation compositions into building materials of a capillary-porous structure by means of impulse impregnation;

Improved:

- the technology for impulse impregnation, which allows to intensify the process of impregnation and increase the permeability of the impregnating solution into the porous structure of the material, which ensures the effective implementation of the process, as well as increases productivity and reduces the time of processing materials.

Practical significance of the results:

- a new technology of impulse impregnation of building materials and products was developed;
- basic and constructive schemes of the equipment for impulse impregnation of building materials and products were developed;
- a technological scheme for modification of construction concrete products by means of impulse impregnation with impregnation compositions was developed;
- the results of the research are implemented in the educational process of bachelors of the Vinnytsia National Technical University, which studying in the specialty 192 «Construction and civil engineering», in the practical activities of the Limited Liability Company «VINNYTSIABUD», in the practical activities of the Limited Liability Company «Hran», and in the practical activity of the Khmelnytskyi filial of the State Scientific Research and Project Research Institute «NDIPROEKTREKONSTRUKTSIA», which are confirmed by the relevant acts of implementation.

Keywords: building materials and products, concrete and reinforced concrete, capillary-porous structure, impregnation, saturation, freeze-thaw cycle, defects and destruction of building materials, energy efficiency and resource conservation, mathematical modeling, resource-saving modification technology, liquid pressure pulses, hydraulic equipment, airfield and road wear, asphalt and cement concrete pavements, causes and factors of influence.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

- матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що внесені до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук:

[1] Горюн О. О. Гідрофобізація будівельних виробів з використанням устаткування для циклічного гідротермічного насичення. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2024. № 36, вип. 1. С. 58–63.

DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-58-63>.

[2] Горюн О. О., Коц І. В. Спосіб імпульсного імпрегнування деревини для будівельних конструкцій. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*. 2024. лип. №28. С. 121-127. DOI: <https://doi.org/10.31650/2707-3068-2024-28-121-127>.

[3] Коц І. В., Горюн О. О. Особливості розповсюдження технологічних скріпних розчинів в пористій структурі щебеневої основи асфальтобетонного покриття при імпульсному ін'єкційному закріпленні. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2023. №35, вип. 2. С. 62-69.

DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-2-62-69>.

[4] Горюн О. О. Аналітичне дослідження стану існуючих асфальто- та цементобетонних аеродромних покриттів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. №26, вип. 1. С. 38–42.

DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-1-38-42>.

[5] Коц І. В., Горюн О. О. Математичне моделювання процесів насичення бетонних зразків під дією гідроімпульсного навантаження. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. №27, вип. 2. С. 123–129.

DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-123-129>.

Документи інтелектуальної власності, що отримані за результатами дисертації:

- патенти на корисну модель:

[6] Спосіб виготовлення бетонополімерних виробів: пат. 142720 Україна. № u201911894; заявл. 13.12.2019 ; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12. 4 с.

[7] Устаткування для циклічного гідротермічного насичення бетонних та залізобетонних виробів: пат. 140195 Україна. № u201907557; заявл. 05.07.2019 ; опубл. 10.02.2020, Бюл. № 3. 5 с.

[8] Генератор імпульсів ін'єкційного пристрою для закріплення несучих основ споруд: пат. 117380 Україна. № u201700084; заявл. 03.01.2017 ; опубл. 26.06.2017, Бюл. № 12. 4 с.

[9] Ін'єктор для закріплення несучих основ споруд з імпульсною подачею суміші: пат. 117371 Україна. № u201700057; заявл. 03.01.2017 ; опубл. 26.06.2017, Бюл. № 12. 5 с.

[10] Устаткування для циклічного гідротермічного насичення будівельних виробів: пат. 145860 Україна. № u202004696; заявл. 24.07.2020 ; опубл. 6.01.2021, Бюл. № 1. 6 с.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[11] Горюн О. О. «Вплив води на руйнування бетонних структур і технологія для підвищення довговічності бетонів», на ІІІ наук.-техн. конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, Україна, 20-22 березня 2024 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/38408>.

[12] Горюн О. О. «Використання модифікованої деревини для будівництва ефективних фортифікаційних споруд» на Всеукраїнській наук.-практ. інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)», Вінниця, Україна, 11-20 травня 2024 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/43275/getfile.pdf>.

[13] Горюн О. О. «Побудова дерева логічного висновку та лінгвістична оцінка змінних параметрів, що впливають на технічний стан устаткування для імпрегнування будівельних виробів» на Всеукраїнській наук.-техн. Конференції «Енергоефективність в галузях економіки України», Вінниця, Україна, 21—23 листопада 2023 р., URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2023/schedConf/overview>.

[14] Коц І. В., Горюн О. О. «Гідроімпульсне просочення будівельних виробів спеціальними рідинами, технології та обладнання» на LII Всеукраїнській наук.-техн. конф. факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання, Вінниця, Україна, 21-23 червня 2023 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/40897>.

[15] Горюн О. О. «Вибір параметрів устаткування для просочення капілярно-пористих матеріалів» на Всеукраїнській наук.-техн. Конференції «Енергоефективність в галузях економіки України», Вінниця, Україна, 23—25 листопада 2021 р., URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2021/paper/viewFile/13953/11813>

[16] Коц І. В., Горюн О. О. «Технологія та устаткування для імпульсного насичення спеціальними речовинами капілярно-пористих будівельних та інших видів матеріалів і виробів » на XIX Всеукраїнській наук.-техн. конференції «Потураєвські читання», Дніпро, Україна, 22 квітня 2021р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/32174>.

[17] Горюн О. О. «Гідротермальна обробка та імпульсне насичення капілярно-пористих матеріалів» на Всеукраїнській наук.-практ. інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2020)», Вінниця, Україна, 9 листопада 2020 р., URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2020/paper/view/10910/9098>.

[18] Горюн О. О. «Аналітичний огляд факторів надійності устаткування для імпульсного гідротермічного імпрегнування будівельних матеріалів» на L Всеукраїнській наук.-техн. конференції факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання, Вінниця, Україна, 20-23 березня 2021 р. URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp2021/paper/view/12422>.

[19] Коц І. В., Горюн О. О. «Технологія та устаткування для імпульсного насичення будівельних виробів » на Міжнародній наук.-технічн. конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» , м. Вінниця, 13 – 15 травня 2021 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/36972>

[/13463-48191-1-PB.pdf](#).

[20] Горюн О.О. «Гідротермальна обробка та імпульсне насичення капілярно-пористих матеріалів» на Міжнародній наук.-технічн. конференції «Інноваційні технології в будівництві», Вінниця, Україна, 10-12 листопада 2020 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/31876/%D0%93%D0%BE%D1%80%D1%8E%D0%BD.pdf>.

[21] Горюн О.О. «Варіанти устаткування для імпульсного насичення будівельних виробів» на XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, Україна, 27-28 квітня 2020 р., URI: https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/1/vntu_2020_netpub.pdf.

[22] Горюн О. О. «Проблемні питання математичного моделювання імпрегнування будівельних матеріалів на основі бетону за рахунок імпульсів тиску просочувальної рідини» на Всеукраїнській наук.-техн. Конференції «Енергоефективність в галузях економіки України», 12-14 листопада 2019 р., URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2019/paper/view/8244/6909>

[23] Горюн О. О., Коц І. В. «Устаткування для циклічного гідротермічного насичення мономерами бетонних та залізобетонних виробів» на Міжнародній наук.-технічн. конференції «Перспективи розвитку машинобудування», Вінниця, Україна, 13 – 15 травня 2019 р. URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/23701>.

[24] Горюн О. О. «Напрямки вдосконалення технологій виготовлення будівельних виробів на основі полімерного бетону для аеродромних покриттів» на XLVIII наук.-техн. конференції факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання, Вінниця, Україна, 13-15 березня 2019 р., URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2019/paper/view/7005/5793>.

[25] Горюн О. О., Коц І. В. «Аналітичний огляд недоліків існуючих цементобетонних аеродромних покриттів» на Міжнародній наук.-технічн. конференції «Інноваційні технології в будівництві», Вінниця, Україна, 13-15 листопада 2018 р., URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2018/paper>

[/viewFile/5908/5015.](#)

[26] Горюн О. О. Коц І. В. «Устаткування комбінованої вакуумної та гідроімпульсної силової взаємодії з м'ясною сировиною при її масажуванні та насиченні рідкими інгредієнтами» на Всеукраїнській наук.-практ. інтернет-конференції «Інноваційні технології виробництва та переробки тваринницької продукції», Вінниця, Україна, 25-26 жовтня 2018 р.

[27] Горюн О. О. Коц І. В. «Аналітичний огляд та проблематика сучасних технологій виготовлення бетонополімерів» на XIII International scientific and practical Conference "Scientific horizons", Sheffield, UK. September 30-October 7, 2018. URI: <https://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/36924/1/SCIENTIFIC%20HORIZONS%20-%202018%20tom-5.pdf>.

[28] Горюн О. О. «Існуючі уявлення щодо механізму насичення будівельних матеріалів спеціальними речовинами» на Всеукраїнській наук.-практ. інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2018)», Вінниця, Україна, 6 червня 2018 р., URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2018/paper/view/5708>.

[29] Горюн О. О. Коц І. В. «Гідроімпульсне устаткування для інтенсифікації процесів масажування і насичення інгредієнтами м'ясної сировини» на Всеукраїнській наук.-практ. інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку тваринництва та харчової галузі», Вінниця, Україна, 26 квітня 2018 р.

[30] Коц І., В., Горюн О. О. «Аналітичний огляд та проблематика сучасних технологій виготовлення бетонополімерів» на XLVII Всеукраїнській наук.-техн. конф. факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання, Вінниця, Україна, 14-23 березня 2018 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/21016/3909.pdf>.

[31] Коц І. В., Горюн О. О. «Устаткування для імпульсного насичення спеціальними рідинами органічних будівельних матеріалів та виробів» на Всеукраїнській наук.-техн. Конференції «Енергоефективність в галузях економіки України», Вінниця, Україна, 23—11-13 листопада 2017 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/19623/Gorun%2C%20Kots%20%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B0.pdf>.

[32] Горюн О. О. «Теоретичні та експериментальні дослідження впливу вібрацій на зменшення сил тертя під час імпульсного насичення пористих матеріалів», на

XLVI наук.-техн. конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, Україна, 15-24 березня 2017 р., URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itpf/all-fbtegp-2017/index>.

[33] Коц І. В., Горюн О. О. «Дослідження режимів гідро-імпульсного просочення спеціальними розчинами капілярно-пористих матеріалів в автоклавах» на Міжнародній наук.-технічн. конференції «Інноваційні технології в будівництві», Вінниця, Україна, 18-20 листопада 2016 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/19235/Goryn%20O.O.,%20Kots%20I.V..pdf>.

[34] Коц І. В., Горюн О. О. «Устаткування для гідроімпульсного насичення спеціальним розчином капілярно-пористих матеріалів» на Всеукраїнській наук.-практ. інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2018)», Вінниця, Україна, 4-10 травня 2016 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/11707/%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%BA%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F%20%D0%B3%D1%96%D0%B4%D1%80%D0%BE%D1%96%D0%BC%D0%BF%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE.pdf>.

[35] Горюн О. О. «Дослідження процесів імпульсного насичення просочуваним розчином капілярно-пористих матеріалів» на XLV Всеукраїнській наук.-техн. конф. факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання, Вінниця, Україна, 2-11 березня 2016 р., URI: https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/1/fbtegp_2016_netpub.pdf#page=36.

[36] Коц І. В. Горюн О. О. «Устаткування для імпульсного насичення високотемпературними розчинами органічних матеріалів» на Міжнародній наук.-технічн. конференції «Енергоефективність в галузях економіки України», Вінниця, Україна, 17-19 листопада 2015 р., URI: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/11707>.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	25
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	31
1.1 Структура капілярно-пористих будівельних матеріалів	31
1.2 Загальна характеристика бетону як капілярно-пористого матеріалу	35
1.3 Огляд проблем немодифікованих будівельних виробів із бетону.....	39
1.4 Методи модифікації будівельних матеріалів та виробів	42
1.4.1 Попередня обробка.....	45
1.4.2 Імпрегнування без застосування тиску	46
1.4.3 Імпрегнування під тиском	50
1.5 Аналітичний огляд відомих пристроїв та устаткування, що використовуються для імпрегнування будівельних матеріалів та виробів	58
1.6 Вплив різних просочувальних композицій на властивості модифікованих будівельних матеріалів.....	63
1.7 Задачі дослідження.....	65
1.8 Висновки до розділу 1.....	66
РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИКОРИСТАНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	68
2.1 Мета та задачі експериментальних досліджень	68
2.2 Характеристики вихідних матеріалів	68
2.3 Параметри дослідних зразків.....	71
2.4 Експериментальний стенд	73
2.5 Методика проведення експериментальних досліджень	76
2.6 Планування багатofакторного експерименту	83
2.7 Висновки до розділу 2.....	91
РОЗДІЛ 3 АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОНИКНЕННЯ РІДИН В КАПІЛЯРНО-ПОРИСТІ ТІЛА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ УСТАТКУВАННЯ В ПРОЦЕСІ ПРОСОЧУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	93
3.1 Мета та задачі теоретичного дослідження проникнення рідин в товщу будівельних матеріалів в процесі імпрегнування. Основні припущення	93

3.2 Особливості розповсюдження технологічних розчинів в капілярно-пористій структурі будівельних матеріалів у процесі імпульсного імпрегнування	94
3.3 Математичне моделювання оцінювання технічного стану устаткування для імпульсного імпрегнування виробів із бетону.....	105
3.4 Висновки до розділу 3.....	112
4 РОЗДІЛ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІМПУЛЬСНОГО ІМПРЕГНУВАННЯ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНУ	114
4.1 Водопоглинання та глибина імпрегнування дослідних зразків, імпрегнованих розчином метилсиліконату калію.....	114
4.2 Фізико-механічні властивості дослідних зразків, імпрегнованих рідким натрієвим склом.....	118
4.3 Висновки до розділу 4.....	123
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИНТЕЗ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ МОДИФІКАЦІЇ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ ІЗ БЕТОНУ ШЛЯХОМ ІМПУЛЬСНОГО ІМПРЕГНУВАННЯ. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО ІМПРЕГНУВАННЯ	125
5.1 Обґрунтування обраного методу модифікації будівельних виробів	125
5.2 Імпульсна технологія модифікації будівельних виробів із бетону.....	125
5.3 Перспективи застосування технології імпульсного імпрегнування будівельних виробів	130
5.4 Принципові та конструктивні схеми імпульсного устаткування для імпрегнування будівельних матеріалів	134
5.5 Синтез оптимального варіанту технологічного обладнання імпульсної дії для модифікації будівельних матеріалів	141
5.6 Розрахунок техніко-економічної ефективності використання установки імпульсного просочення бетонів.....	145
5.7 Висновки до розділу 5.....	148
ВИСНОВКИ.....	151
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	154
ДОДАТОК А	175
ДОДАТОК Б.....	181

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

КПТ — капілярно-пористе тіло.

КПС — капілярно-пориста структура.

УЗ — ультразвук.

ВТВ — вакуум-тиск-вакуум.

ТТВ — тиск-тиск-вакуум.

ТВ — тиск-вакуум.

НДЛ — науково-дослідна лабораторія.

ВНТУ — Вінницький національний технічний університет.

РІС — polymer impregnation concrete.

ММА — метилметакрилат.

ПЦ — портландцемент.

В/Ц — водоцементне відношення.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Модифікація будівельних виробів із бетону є важливим напрямком сучасних досліджень у галузі будівельного матеріалознавства та будівельних технологій. Відомо, що бетон є капілярно-пористим будівельним матеріалом і, незважаючи на свої позитивні властивості, такі як висока міцність та доступність, має ряд недоліків, зокрема, високе водопоглинання, низьку морозостійкість, підвищену чутливість до агресивних середовищ. Ці проблеми можуть призводити до передчасного руйнування конструкцій, збільшення витрат на їх обслуговування та скорочення терміну експлуатації.

Одним із перспективних шляхів подолання цих недоліків є імпрегнування бетону спеціальними технологічними рідинами (просочувальними композиціями), що дозволяє покращити його фізико-механічні властивості, зокрема, зменшити водопоглинання, підвищити стійкість до морозу, знизити проникність та підвищити стійкість агресивних хімічних впливів, а також покращити механічні характеристики. Однак традиційні методи імпрегнування мають обмеження щодо глибини проникнення та рівномірності розподілу рідини в структурі бетону, що знижує ефективність модифікації.

Імпульсне імпрегнування дозволяє досягати глибокого та більш рівномірного проникнення просочувальних композицій, що значно підвищує якість обробки через поліпшення фізико-механічних та експлуатаційних характеристик, а також сприяє збільшенню терміну служби виробів із бетону. Впровадження технології імпульсного імпрегнування відкриває нові можливості для вдосконалення процесу обробки будівельних виробів. Використання такого методу сприяє зменшенню часу обробки, збільшенню економічної ефективності та підвищенню експлуатаційних властивостей матеріалу.

Таким чином, дослідження, спрямовані на розробку та впровадження технології та устаткування для імпульсного імпрегнування для модифікації виробів із бетону, є надзвичайно актуальними з наукової та практичної точок

зору. Вони відповідають сучасним вимогам до підвищення довговічності та надійності будівельних матеріалів, що дозволить розширити сферу їх застосування в різних експлуатаційних умовах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дисертаційна робота виконувалась здобувачем протягом 2017-2024 рр. відповідно до наукової, науково-технічної та інноваційної діяльності кафедри інженерних систем у будівництві Вінницького національного технічного університету, та відповідає кафедральній темі 93К2 «Розробка наукових основ створення інноваційних енергозберігаючих процесів і технологій в галузі будівництва та цивільної інженерії».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є модифікація будівельних виробів із бетону для покращення фізико-механічних властивостей шляхом імпульсного імпрегнування їх капілярно-пористої структури.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі основні завдання:

- виконати аналітичний огляд відомих методів модифікації будівельних матеріалів та виробів, зокрема технологій імпрегнування;
- проаналізувати конструкції існуючого устаткування для модифікації будівельних матеріалів та виробів шляхом імпрегнування;
- виконати математичне моделювання процесів проникнення просочувальних композицій в капілярно-пористу структуру бетону під час імпульсного імпрегнування;
- визначити вплив різних просочувальних композицій на фізико-механічні властивості будівельних виробів із бетону модифікованого способом імпульсного імпрегнування;
- розробити нову енергоефективну технологію для модифікації будівельних матеріалів шляхом імпульсного імпрегнування;

- розробити принципові та конструктивні схеми прототипів обладнання та обрати оптимальний варіант конструкції устаткування для імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів.

Об'єкт дослідження — будівельні вироби з бетону та технології і устаткування імпрегнування для отримання покращених фізико-механічних та експлуатаційних властивостей виробів.

Предмет дослідження — дослідження фізико-механічних характеристик будівельних виробів із бетону з використанням технології та устаткування для імпульсного імпрегнування.

Методи дослідження. При виконанні роботи застосовувався комплексний підхід, що включає в себе системний аналіз і узагальнення досвіду за темою дослідження, математичне моделювання гідродинамічних процесів, лабораторні дослідження впливу застосування технології імпульсного імпрегнування на властивості бетону. Для проведення експериментальних досліджень було використано методи планування експерименту. Фізико-механічні показники випробуваних зразків виконувалися згідно нормативних стандартних методів визначення міцності та водопоглинання будівельних матеріалів і виробів. На основі методів нечітких множин виконано прогнозування надійності устаткування в залежності від проєктних рішень, роботи по монтажу і встановленню обладнання, експлуатаційних факторів.

Наукова новизна.

Уперше:

- встановлено експериментальним шляхом, що внаслідок імпульсного імпрегнування зразків бетону розчином силікону, досягається зменшення водопоглинання з 7,12% до 1,36%;
- встановлено експериментальним шляхом, що внаслідок імпульсного імпрегнування зразків бетону рідким натрієвим склом, досягається збільшення показників міцності на стиск від 17,2 МПа до 29,9 МПа та міцності на згин від 3,3 МПа до 7,1 МПа;

Набуло подальшого розвитку:

- встановлення аналітичних залежностей, що пов'язують основні процеси, які відбуваються під час проникнення просочувальних композицій в будівельні матеріали капілярно-пористої будови шляхом імпульсного імпрегнування;

Удосконалено:

- технологію для імпульсного імпрегнування, яка дозволяє інтенсифікувати процес просочення та збільшити проникність імпрегнуючого розчину у пористу структуру матеріалу яке забезпечує ефективне проведення процесу, а також збільшує продуктивність та скорочує час обробки матеріалів.

Практичне значення:

- розроблено нову технологію імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів та виробів;
- розроблено принципові та конструктивні схеми устаткування для імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів та виробів;
- розроблено технологічну схему модифікації будівельних виробів із бетону шляхом імпульсного імпрегнування просочувальними композиціями;
- результати дослідження впроваджено в навчальний процес підготовки бакалаврів Вінницького національного технічного університету, які навчаються за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія», у практичну діяльність Товариства з обмеженою відповідальністю «ВІННИЦЯБУД», у практичну діяльність Товариства з обмеженою відповідальністю «Грань», а також у практичну діяльність Хмельницької філії Державного підприємства Державного науково-дослідного та проектно-вишукувального інституту «НДПРОЕКТРЕКОНСТРУКЦІЯ», що підтверджується відповідними актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Виконано аналітичний огляд літературних джерел. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень. Проведено теоретичні дослідження процесів проникнення просочувальних

складів у структуру матеріалів. Зібрано, оброблено та інтерпретовано дані результатів випробувань та параметрів роботи лабораторної установки. Проаналізовано результати експерименту та виконано графічне представлення отриманих залежностей. Запропоновано використання технологічних операцій для ефективної обробки виробів із бетону. Запропоновано концептуальні рішення устаткування для імпрегнування бетонів.

Апробація матеріалів дисертації. Основний зміст дисертації викладено та обговорено на таких наукових конференціях: Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)» (м. Вінниця, травень 2024 р.), LIII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (м. Вінниця, березень 2024 р.), Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність в галузях економіки України» (м. Вінниця, листопад 2023 р.), LI Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (м. Вінниця, червень 2023 р.), Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність в галузях економіки України» (м. Вінниця, листопад 2021 р.), Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» (м. Вінниця, травень 2021 р.), Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (м. Вінниця, листопад 2020 р.), XIX Всеукраїнська науково-технічна конференція «Потураєвські читання» (м. Дніпро, квітень 2021р.), L Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (м. Вінниця, березень 2021 р.), Міжнародна науково-технічна конференція «Інноваційні технології в будівництві» (м. Вінниця, листопад 2020 р.), XLIX Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (м. Вінниця, травень 2020 р.), Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність в галузях економіки України» (м. Вінниця, листопад 2019 р.), Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» (м. Вінниця, травень 2019 р.), XLVIII

Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (м. Вінниця, березень 2019 р.), Міжнародна науково-технічна конференція «Інноваційні технології в будівництві» (м. Вінниця, листопад 2018 р.), Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні технології виробництва та переробки тваринницької продукції» (м. Вінниця, жовтень 2018 р.), XIII International scientific and practical Conference (Sheffield, September - October 2018), Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (м. Вінниця, червень 2018 р.), Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Проблеми та перспективи розвитку тваринництва та харчової галузі» (м. Вінниця, квітень 2018 р.), XLVII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (м. Вінниця, березень 2018 р.), Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність в галузях економіки України» (м. Вінниця, листопад 2017 р.), XLVI Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (м. Вінниця, березень 2017 р.), Міжнародна науково-технічна конференція «Інноваційні технології в будівництві» (м. Вінниця, листопад 2016 р.), Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)» (м. Вінниця, травень 2016 р.), XLV Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (м. Вінниця, березень 2016 р.), Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність в галузях економіки України» (м. Вінниця, листопад 2015 р.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковані у 36 наукових роботах, зокрема 5 статтях у наукових фахових виданнях України, 5 патентах України на корисну модель, 26 тезах доповідей.

Структура і обсяг роботи. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (170 найменувань) та 2 додатків. Робота викладена на 187 сторінках. Робота містить 52 рисунки та 15 таблиць.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Структура капілярно-пористих будівельних матеріалів

Структура будівельних матеріалів дозволяє досліджувати їх внутрішню будову, до якої належить просторове розташування частинок різної дисперсності, що знаходяться у стійких взаємозв'язках з певним порядком зчеплення між собою. Більшість сучасних будівельних матеріалів є капілярно-пористими тілами (КПТ). Концепція структури включає розміри та розташування пор, капілярів, поверхонь розділу фаз, мікротріщин та інших елементів.

На мікроструктурному рівні досліджують структурні елементи будівельних матеріалів, які можна виявити за допомогою оптичного або електронного мікроскопа, диференціально-термічного аналізу, рентгенографії. Розміри таких елементів лежать в діапазоні 10^{-4} ... 10^{-7} м [1]. В розрізі вивчення будівельних матеріалів мікродисперсну структуру зазвичай має в'язуча речовина, контактні зони в матеріалі, що відокремлюють в'язучу речовину від іншого компонента.

На макроструктурному рівні вивчають будову матеріалів більш укрупнено (1 ... 10^{-4} м [1-4]). Макроструктура по відношенню до будівельних матеріалів може бути конгломератною (характерна для бетонів, кераміки), пористою (ніздрюваті газо- та пінобетони, пористий заповнювач), волокнистою (деревина, склопластики, азбестові вироби), дрібнопористою (деякі керамічні матеріали), шаруватою, порошкоподібною та зернистою.

Капілярно-пористі будівельні матеріали характеризуються наявністю системи пор та каналів різних розмірів та форм, що визначає їх фізико-механічні властивості. Пори є ключовими елементами мікроструктури матеріалів, які визначають їхні властивості. Пори у таких матеріалах можуть бути класифіковані за розмірами, формою та функціональними характеристиками.

За критерієм сполучення із зовнішнім середовищем або між собою пори поділяють на замкнуті (закриті) та відкриті або сполучені (див. рис. 1.1).

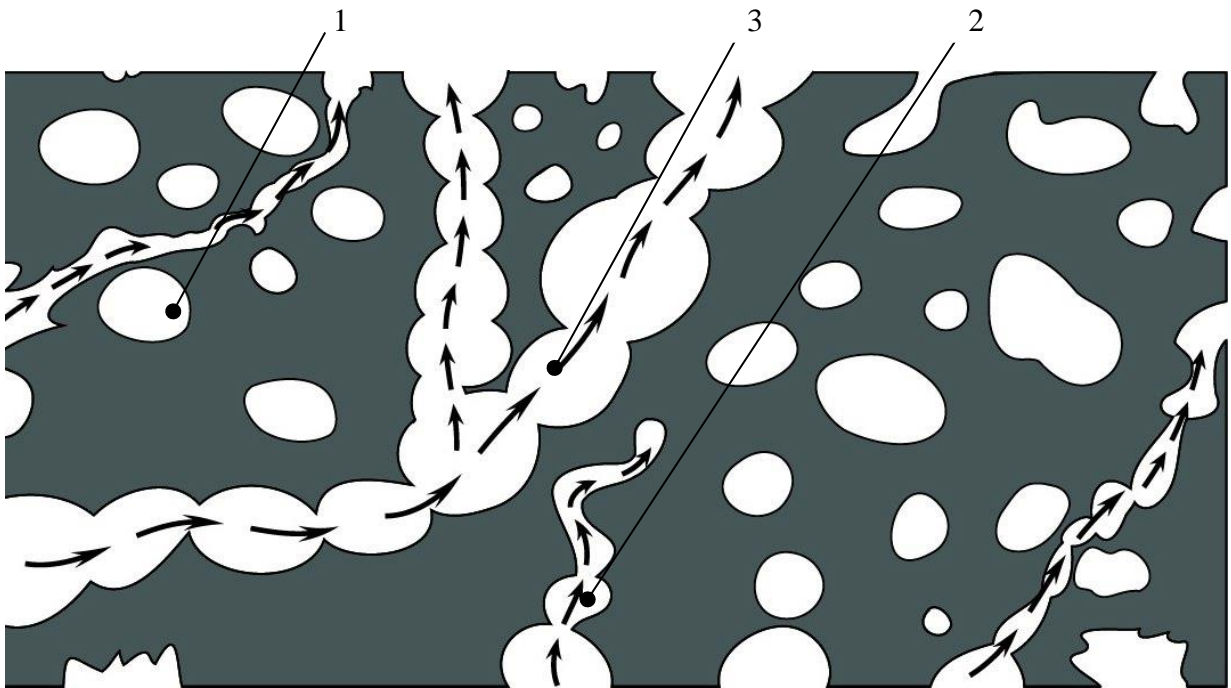


Рисунок 1.1 – Типи пор в будівельних матеріалах:
закриті пори (1), відкриті пори (2), сполучені (транспортні) капілярні пори (3)

Закриті пори характеризуються відсутністю сполучення між собою чи із зовнішнім середовищем. Вони представляють собою ізольовані порожнини всередині матеріалу, які не мають виходу на поверхню та не з'єднані з іншими порами. Закриті пори не впливають на ступінь проникнення рідин і газів в об'єм матеріалу. Закриті пори можуть поліпшувати теплоізоляційні [5-7] властивості матеріалу, оскільки газове середовище, яке заповнює ізольовані порожнини має низьку теплопровідність. Крім того, розмір, форма та рівномірність розподілу пор закритого типу дозволяє впливати на звукоізоляційні, а також міцнісні [8, 9] властивості матеріалу.

Відкриті пори характеризуються тим, що мають прямий зв'язок з поверхнею матеріалу або утворюють капілярну чи пористу мережу крізь яку можуть проникати рідини, гази чи інші речовини. Даний різновид пор впливає на такі властивості матеріалу, як проникність, водопоглинання, адгезія,

звукопоглинання. З-поміж інших, важливими критеріями при розробці матеріалів зі звукопоглинаючими властивостями є: наявність значної кількості пор відповідного розміру, які повинні з'єднуватися між собою для поширення звукових хвиль; між внутрішніми порами та зовнішньою поверхнею матеріалів повинні бути безперервні канали. Ці критерії чітко окреслюють ключовий вплив пор відкритого на акустичні властивості матеріалу. Відкриті пори можуть сприяти капілярному підняттю рідин, що є важливим фактором для матеріалів, що використовуються в умовах впливу вологи.

Таблиця 1.1

Порівняння відкритих та закритих пор

Критерій	Відкриті пори	Закриті пори
Сполучення із зовнішнім середовищем	Є	Немає
Проникність	Висока (для рідин і газів)	Низька
Вплив на водопоглинання	Збільшує	Не впливає
Вплив на теплоізоляцію	Негативний	Позитивний
Вплив на морозостійкість	Знижує	Збільшує
Застосування	Матеріали, що потребують адгезії або мають контактувати з рідинами, звукоізоляційні матеріали	Теплоізоляційні та звукоізоляційні матеріали

Розмір пор значно впливає на властивості матеріалів, визначаючи їхні адсорбційні, механічні та дифузійні характеристики. Згідно класифікації міжнародного союзу фундаментальної та прикладної хімії IUPAC пори класифікують за розмірами на три типи:

- мікропори (з діаметром меншим за 2 нм);
- мезопори (з діаметром від 2 до 50 нм);
- макропори (з діаметром більшим за 50 нм).

Дрібні мікропори пори, зазвичай, є замкнутими. У бетоні вони утворюються переважно внаслідок усадкових процесів. Найменші пори досліджувані на мікроструктурному рівні в будівельних матеріалах називають ультрамікропорами. Вони утворюються переважно через анізотропію властивостей кристалів і частинок конденсаційних структур, а також їхню орієнтацію у просторі під час росту [10].

Структура будівельних матеріалів може включати більші пори, які залежно від розміру поділяють на мезопори та макропори. Пори більшого розміру утворюються переважно внаслідок технологічних процесів виробництва. Основні фактори їх утворення: випаровування надлишкової вологи, нещільне укладання суміші, руйнівні процеси вилуговування, дегідратації, вивітрювання, захоплення повітря шляхом використання повітровтягуючих добавок для виробництва ніздрюватих бетонів тощо [10, 11].

Пори, утворені через випаровування капілярної вологи представляють собою капілярні чи транспортні пори, які є відкритими або сполученими між собою і здебільшого відносяться до мезопор. Макропори можна побачити неозброєним оком, розмір макропор в будівельних матеріалах варіюється від 50 мкм до 2-5 мм [11].

У мікроструктурах можуть бути присутні й інші види порожнин. У більшості випадків їх вважають дефектами мікроструктури, які негативно впливають на якість матеріалу. До них відносяться дефекти кристалічної решітки, спричинені переміщенням атома з вузла решітки, або домішками в кристалічній решітці, що значно знижують якість будівельного матеріалу. Небезпечними і важкопрогнозованими є дефекти, що представлені у вигляді мікротріщин. Такі мікрокріщини під впливом навантажень можуть збільшуватися у розмірах та перетворюватися в макротріщини або магістральні тріщини, що розмежовують великі об'єми кристалічних агрегатів і тіл.

У будівельних матеріалах та виробках пори та інші види нещільностей (мікро- і макротріщини, раковини та каверни, порожнини та пустоти) зосереджені у в'язучій частині, що заповнює компоненти, та в контактній зоні,

тобто на поверхнях розділу цих двох структурних компонентів [11]. Це чітко можна побачити на прикладі цементних бетонів, ніздрюватих бетонів тощо.

Для оцінювання залежності властивостей матеріалів від їх структури використовують поняття пористості. Пористість характеризує матеріал з точки зору наявності в ньому порожнин (пор) і відображає відношення об'єму пор до загального об'єму матеріалу. По відношенню до будівельних матеріалів розрізняють загальну (повну), відкриту та закриту пористість. Міцність на стиск і еластичність пов'язані із загальною пористістю, а усадка та повзучість є функціями властивостей пор [10].

1.2 Загальна характеристика бетону як капілярно-пористого матеріалу

Бетон — композиційний штучний будівельний матеріал, який одержують у результаті замішування раціонально підбраної суміші в'язучого (цемент, бітум), води і заповнювачів (гравій, щебінь, пісок, дрібний шлак та ін.) і в разі потреби спеціальних добавок, що є одним із основних будівельних матеріалів для зведення будинків і споруд [12]. Бетон є другою за кількістю використовуваних речовин у світі після води [13], а також одним з найбільш поширених будівельних матеріалів, який використовується у різних типах конструкцій [14].

Особливістю структури бетону є високий ступінь неоднорідності. У структурі бетону виділяють три елементи: цементний камінь, заповнювач і зону контакту між ними [15]. При дослідженні конгломератної структури бетону видно, що внутрішня його будова є неоднорідною, а багатокомпонентною. Поліструктурну систему бетону вивчають на мікро-, макро- та мезорівні.

На мікрорівні досліджують цементний камінь, який представляє собою колоїдно-кристалічну і капілярно-пористу систему, що заповнює проміжки між твердим скелетом великих та дрібних заповнювачів [16]. До складу цементного каменю входять гідратована та негідратована частини. Гідратована частина включає продукти гідратації, а саме: портландит, еtringіт, гідросилікати

кальцію, гелеподібну фазу. До негідратованої частини відносять негідратовані зерна цементу, мікропори та воду що заповнює пори [17]. До ультрамікропор відносять у бетоні відносять гелеві пори розміром $(15...40) \times 10^{-10} \text{ м}$ [2, 9, 10], які утворюються в частинках гідратованого цементу. Класифікація основних видів пор у бетоні на мікроструктурному рівні за [10] представлено на рис. 1.2.

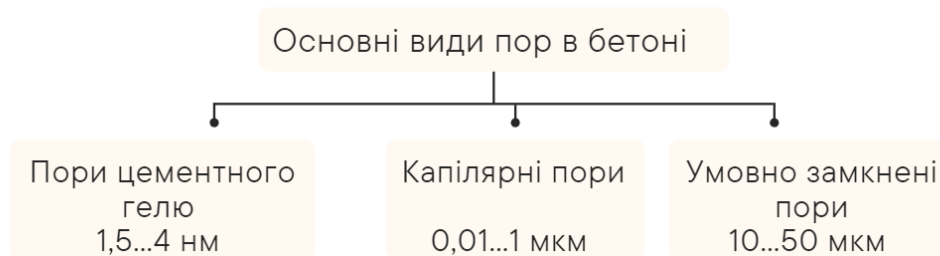


Рисунок 1.2 – Основні види пор у бетоні

Дослідження фрактальності бетону вказують на те, що структура бетону на макрорівні подібна за будовою до самого бетону (рис. 1.3.), тому її прийнято називати мікробетоном [2-4, 18].

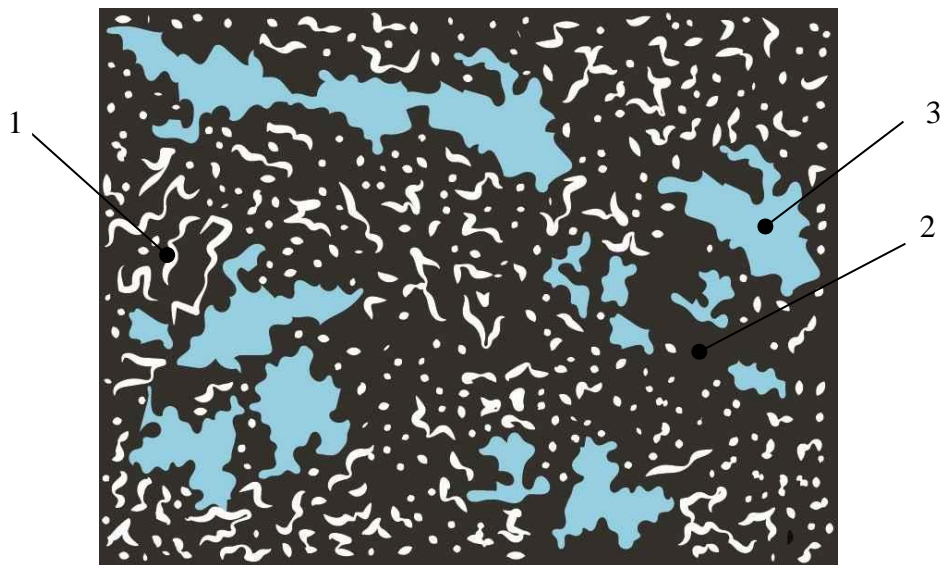


Рисунок 1.3 – Мікроструктура цементного каменю: гелеві пори (1), гелеві зерна (2), капілярні пустоти (3)

Мезоструктуру розглядають в розрізі структури цементно-піщаного розчину в класичному бетоні. Ця структура визначається властивостями мікроструктури цементного каменю, включаючи зерновий і хіміко-мінералогічний склад дрібного заповнювача та контактний шар — пористий простір між цементним каменем і заповнювачем у зоні їхнього контакту (капілярні пори та канали) [18]. Мезоструктура характеризує фізичну взаємодію часток заповнювача як між собою, так і з частинками цементу, що підлягають гідратації [19]. Закриті мезопори можуть впливати на теплопровідність, а відкриті — на дифузійні властивості матеріалу. Часто пори такого типу мають визначальний вплив на міцність та проникність. Кількість великих пор залежить від способу їх утворення в матеріалі: природного або штучного. Наприклад, при випадковому залученні повітря під час приготування бетонної суміші, кількість таких пор зазвичай невелика і досягає значення 2...5% [10]. Якщо ж пори утворюються внаслідок використання спеціальних повітровтягуючих або пороутворюючих добавок (повітряні пори), то в пористій в'язкій речовині може міститися до 50% і більше за об'ємом сферичних пор, які найчастіше є замкненими.

Вивчення бетону як композиційного матеріалу на макроструктурному рівні передбачає розгляд системи цементний камінь-контактна зона-заповнювач. Однак здебільшого досліджують двокомпонентну систему «матриця-заповнювач» [16, 17, 19]. Властивості макроструктури визначаються властивостями мікро- та мезоструктури, хімічним складом та будовою крупного заповнювача, а також його співвідношенням з двома іншими структурами. Тут в ролі матриці розглядають цементний камінь або цементно-піщаний розчин (мезоструктура) [19], утворений твердінням в'язучого компоненту, що виконує роль дисперсійного середовища для полідисперсної суміші зерен заповнювачів разом з контактною зоною і повітряними включеннями.

У макроструктурі бетону переважно розглядають такі типи пор: відкриті тріщини, пустоти та порожнини. Причинами утворення макротріщин є

технологічні (усадка) та експлуатаційні фактори [20]. Пустоти та порожнини здебільшого формуються в контактній зоні поряд із зернами крупного заповнювача як наслідок поганого ущільнення, наявності води біля крупного заповнювача тощо.

Пориста структура бетону утворюється внаслідок гідратації цементу та випаровування води в ході його виробництва і обумовлена водоцементним співвідношенням та умовами твердіння. За розташуванням в бетоні пори поділяють на такі різновиди: пори цементного каменю, пори заповнювача, а також пори контактної зони на межі розділу заповнювача та цементного каменю [20].

В КПС цементного каменю можна виділити такі типи пор за походженням:

- ультрамікропори цементного гелю розміром від 0,5 нм до 2,5 мкм [2, 4, 11, 17, 20] є переважно закритими порами, що виникають між продуктами гідратації та мають сферичну та капілярну будову;
- великі та середні капілярні пори відкритого типу в яких помірно проявляється дія поверхневого натягу представляють систему сполучених каналів розміром від 10 нм до 15 мкм [1, 2, 17, 20], що утворюються між гідратованим та не гідратованим цементом і розділені цементним гелем;
- відкриті седиментаційні сполучені пори розміром від 50 до 100 мкм [17], що утворюються в результаті поверхневого або внутрішнього водовідділення і представляють собою розшарування бетону на мікрорівні;
- макропори (повітряні пори) розміром від 15 мкм до 1100 мкм [2, 17, 20] мають форму близьку до сферичної, проявляють властивості об'ємного середовища, утворюються за наявності повітря та регулюються повітровтягуючими добавками.

Для бетону характерний ряд структурних груп, серед яких розрізняють [20, 21]: щільну структуру, характерну для звичайних важких

бетонів; структуру з пористим заповнювачем (легкі бетони); крупнопористу структуру (ніздрюваті газо- і пінобетони). Особливістю КПС залізобетону у порівнянні з бетоном є наявність додаткових пор, що утворюються між прутами арматури.

Капілярно-пориста структура (КПС) будівельних виробів із бетону, що проявляється у формах, розмірах, та розподілу пор по об'єму матеріалу, суттєво впливає на його властивості, зокрема на міцність, водопоглинання, морозостійкість та разом з іншими експлуатаційними характеристиками напряду визначає якість та довговічність будівельних виробів. Аналізуючи вищевказане можна дійти висновку, що структура бетону, яка містить пори з капілярами, мікро- та макротріщини, а також інші порожнини, має значний вплив на формування фізико-механічних властивостей бетону.

1.3 Огляд проблем немодифікованих будівельних виробів із бетону

Будівельні матеріали на основі бетону мають ряд недоліків, які впливають на їхню довговічність і надійність. Серед основних недоліків таких матеріалів можна виділити значне водопоглинання, низьку морозостійкість, низьку хімічну стійкість, проникність, тріщиноутворення (рис. 1.4).

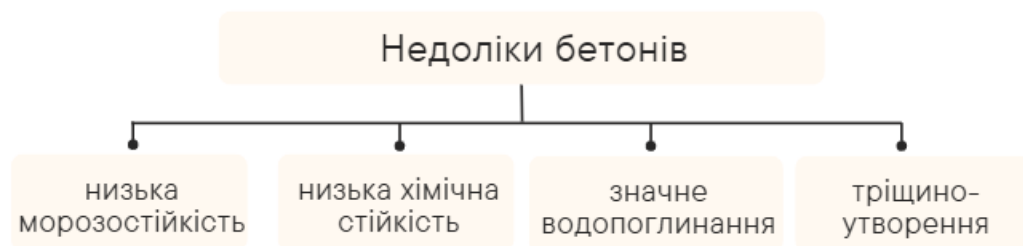


Рисунок 1.4 – Основні недоліки бетонів

Низька морозостійкість обумовлена високим ступенем водопоглинання через КПС бетону, яка дозволяє воді проникати в матеріал і накопичуватися в порах та тріщинах. Коли температура знижується до точки замерзання, вода

всередині бетону замерзає і розширюється, створюючи додатковий тиск на стінки пор і мікротріщини. Процеси циклічного заморожування і розморожування води, що проникає в пори бетону, викликають розширення і стиснення, що призводить до утворення тріщин і поступового руйнування матеріалу.

Крім того, пориста структура бетону дозволяє воді або іншим рідинам проникати глибоко всередину, що може призвести до хімічних реакцій з цементним каменем та корозії бетону, сталеві арматури. Це знижує міцність та довговічність бетонних та залізобетонних конструкцій.

Тріщиноутворення, розшарування матеріалу та інші явища, що призводять до руйнування бетону можуть бути спровоковані технологічними чинниками, такими як усадка [20-22], що відбувається в ході виробництва бетону, або впливом експлуатаційних факторів, таких як механічні навантаження, температурні впливи тощо.

Руйнування бетону може бути викликане різними факторами, пов'язаними з його складом, умовами експлуатації та зовнішніми впливами. Найчастіше це відбувається, коли матеріал довго перебуває під впливом вологи при контакті з ґрунтом, вологи атмосферного повітря, води або хімічних речовин. Такому впливу піддаються, наприклад, фундаменти, елементи парапетів, конструкції мостів, залізничні шпали, аеродромні покриття, дорожній одяг, бордюрний камінь, тротуарні покриття, конструкції гідротехнічних споруд (лотки, збірні покриття, трубопроводи), архітектурно-декоративні елементи.

Фізичні причини руйнування бетону можна розділити на два типи: втрата маси бетонної поверхні внаслідок стирання; утворення тріщин внаслідок виникнення градієнтів температури, вологості, дії тиску через кристалізацію солей та структурне навантаження [23-25]. Стирання виникає внаслідок зношування, яке відбувається на поверхні конструкції, коли існують важкі умови стирання, наприклад, дорожні покриття, аеродромні покриття [24-26]. Вплив великих механічних навантажень, вібрацій або ударів може призвести до утворення тріщин і пошкодження структури бетону. Усадка бетону під час

твердіння може викликати утворення тріщин, особливо в великих монолітних конструкціях. Ніздрюваті бетони, такі як газобетон і пінобетон, також піддаються впливу контракційної, вологісної та карбонізаційної видів усадочних процесів [27], і крім того, характеризуються вищим показником крихкості у порівнянні з традиційним бетоном, що обмежує їх застосування несучих в конструкціях. Основні типи факторів руйнування бетону наведено на рис. 1.5.

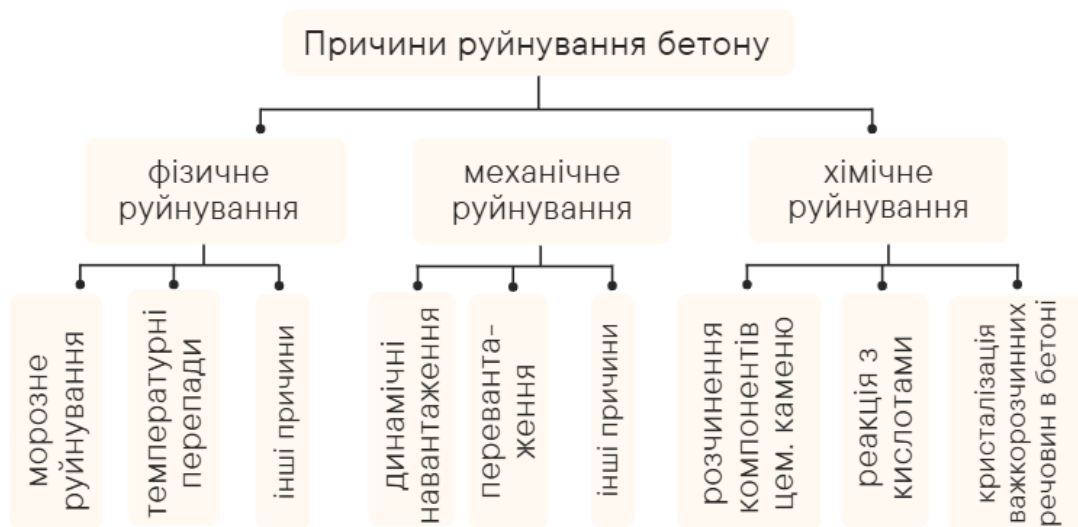


Рисунок 1.5 – Класифікація факторів руйнування бетону

Вогневий вплив на бетон є критичним фактором, який може значно знизити його міцність і довговічність. При підвищенні температури відбувається розширення, що може призводити до утворення тріщин через напруги всередині матеріалу. При високих температурах понад $+500^{\circ}\text{C}$ у залізобетоні різко втрачається зчеплення арматури з бетоном [22]. Крім того, при дії високих температур відбувається руйнування бетону внаслідок температурних деформацій його компонентів, починається процес розкладання гідратів цементного каменю з утворенням вапна, що гаситься хімічно незв'язною водою, збільшується в об'ємі та призводить до появи розривів в матеріалі. Втрата жорсткості у ніздрюватих бетонах відбувається вже за температури $+90^{\circ}\text{C}$ в результаті розширення та випаровування води з тіла бетону [28].

Хімічне руйнування бетонів розділяють на три типи: розчинення компонентів цементного каменю (мова йде про вимивання гідрату оксиду кальцію); реакцію цементного каменю із агресивними речовинами (кислотами) з утворенням та відкладенням в структурі матеріалу солей; реакції, що призводять до утворення і кристалізації у порах бетону важкорозчинних речовин [23-25]. Виділяють також біологічне руйнування бетону, проте такий вид корозії часто зводиться до порушення зчеплення складових компонентів матеріалу через вплив мінеральних та органічних кислот органічного походження, тобто корозія відбувається в результаті хімічних реакцій між цементним каменем і продуктами життєдіяльності мікроорганізмів [25, 29].

Корозія арматурної сталі в залізобетоні поєднує в собі фізичну та хімічну природу руйнування. До прикладу, корозія на залізобетонних мостах нерідко спричинена проникненням в товщу залізобетону хлоридів, що містяться в компонентах антиожеледних солей [23]. Додатковими факторами хімічного руйнування дорожніх покриттів чи збірних аеродромних плит на злітно-посадкових аеродромів смугах є їхнє розташування в районах з великою загазованістю, а також обробка речовинами, що містять сірчановодневі сполуки, що сприяє розвитку тонових бактерій, які продукують сірчану кислоту [25]. Руйнування бетону через хімічні реакції між гідратованим портландцементом і сульфатними іонами може проявлятися розширенням і тріщинами або поступовою втратою когезії та міцності. Найбільш вразливим є вплив сульфатів, який виникає через взаємодію гідроксиду кальцію та фаз, що містять оксид алюмінію. Захист від цього можливий завдяки використанню щільного якісного бетону з низькою вологістю.

1.4 Методи модифікації будівельних матеріалів та виробів

Модифікація будівельних матеріалів — важливий процес, спрямований на покращення їх властивостей. До основних відомих способів модифікації

будівельних матеріалів та виробів із бетону відносять додавання домішок, термічну обробку, ультразвукову обробку, імпрегнування.

Метод додавання добавок полягає у введенні різних компонентів (хімічних, мінеральних або органічних) у матеріал на етапі його виробництва для покращення його властивостей (це можуть бути пластифікатори, прискорювачі твердіння, мікрофібра, повітровтягуючі добавки, відходи промисловості, продукти рециклінгу тощо). Деякі відомі способи реалізації цього методу, а також результати впливу добавок на властивості матеріалів детально описані в роботах [30-44], де було доведено їх ефективність у підвищенні міцності та довговічності будівельних матеріалів.

Термічна обробка часто має на меті створити вплив на зміну структури бетону. Термічна обробка в автоклавах використовується для прискорення процесів гідратації у бетоні з утворенням більш щільної структури матеріалу. Деякі дослідження термічної обробки бетонів наведені в роботах [44-50]. Процес термічної обробки часто поєднують з іншими процесами в технологіях модифікації будівельних матеріалів або використовують як спосіб попередньої обробки матеріалів перед модифікацією.

Відомі способи *ультразвукової обробки* будівельних матеріалів [51, 52], де ультразвукові коливання можуть застосовуватися під час приготування сумішей або обробки вже виготовлених матеріалів, внаслідок чого відбувається краще перемішування компонентів суміші, підвищується щільність матеріалу та зменшується його пористість.

Імпрегнування або просочення є одним із найефективніших методів захисту та підвищення властивостей будівельних матеріалів і виробів. Цей метод полягає у насиченні матеріалу спеціальними рідкими композиціями, які змінюють його властивості. Просочення будівельних матеріалів та виробів поділяють на два типи: поверхневе та об'ємне.

Існує багато способів, які забезпечують переміщення просочувального складу всередину капілярно-пористих будівельних матеріалів, таких як бетон. Головними завданнями для забезпечення високоякісного кінцевого

модифікованого продукту є надходження просочувальної композиції в пористу структуру бетону у необхідній кількості, а також його рівномірний розподіл по об'єму матеріалу. З огляду на це, виділяють такі основні показники якості імпрегнування: утримання просочувальної композиції в товщі матеріалу, яке виражається в $[\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}]$ при імпрегнуванні під тиском, або інколи в $[\text{г}\cdot\text{м}^{-2}]$ у випадку імпрегнування без застосування тиску, а також глибина проникнення вказана в $[\text{мм}]$ [53].

Проблемами модифікації будівельних матеріалів та виробів шляхом заповнення просочувальними композиціями їх капілярно-пористої структури та дослідженням бетонів займалися такі вчені та науковці: Дворкін О. Л., Вознесенський В. А., Вітковський Ю. А., Лучко Й. Й., Левченко А. В., Дворкін Л. Й., Цібеленко П. П., Гамеляк І. П., Шумаков І. В., Starck M., Дудар І. Н., Озарків І. М., Перетятко Б. М., Кучеренко О. А., Broomfield J. P., В. В., Бабій І. М., Токарев М. М., Наливайко Т. Т., Критов В. О., Коц І. В., Вировой В. М., Яріз В. О., Кротова О. М., Сердюк В. Р., Ігнатова І. В., Барабаш І. В., Wang B., Цібеленко П. П., Плохута В. О., Воронов, Сланевський С. І., Basheer N. Younis, Shanaz H. Ahmed, Feng M., Walker J. C. F.

Вибір способів імпрегнування залежить від таких факторів як властивості матеріалів, що піддаються модифікації, властивості просочувальних агентів, очікуваний кінцевий результат модифікації, а також інші вимоги. Ступінь водонепроникності, вміст залишкової вологи в об'ємі тіла, характеристика внутрішньої структури та інші відносяться до властивостей матеріалів. Густина, в'язкість, температура кристалізації відносяться до характеристик просочувальних рідин. До інших факторів, що мають вплив на вибір способу імпрегнування можна віднести, наприклад, доступність тієї чи іншої технології.

Модифікацію шляхом імпрегнування можна розділити на обробку без застосування тиску, а також під тиском. За ступенем проникнення просочувальної рідини в товщу матеріалу імпрегнування поділяють на

поверхневе та об'ємне. Імпрегнування будівельних матеріалів часто потребує реалізації заходів щодо їх попередньої обробки.

1.4.1 Попередня обробка

Підготовка до модифікації будівельних матеріалів шляхом імпрегнування може складатися із декількох ключових етапів, які забезпечують належне проникнення просочувальних засобів. До таких етапів можна віднести очищення, сушіння [54, 55] та механічну обробку.

Перед імпрегнуванням матеріал необхідно ретельно очистити від бруду, пилу, масляних плям та інших забруднень. Це покращує надходження просочувальної речовини в структуру матеріалу.

Оптимальною величиною ступеня вологості будівельних матеріалів перед подальшим просочуванням є показник 20 ... 30%. Якщо мова йде про деревину, то для якісного її імпрегнування необхідно орієнтуватися на рівень її вологості в діапазоні 25 ... 30%. Для досягнення необхідного ступеня вологовмісту матеріалів використовують різноманітні технології сушіння. Сушіння будівельних матеріалів перед імпрегнуванням є важливим етапом, який багато в чому визначає глибину нагнітання та рівномірність розподілу просочувального складу в товщі модифікованих матеріалів, адже наявність надмірної кількості вологи значно знижує ефективність просочування.

Залежно від типу матеріалу, може виникнути необхідність у попередній механічній обробці, наприклад, шліфуванні, свердлінні, надрізанні. Стосовно деяких матеріалів це дозволяє зменшити імовірність розтріскування після імпрегнування, а також покращує проникнення засобу в матеріал.

1.4.2 Імпрегнування без застосування тиску

Очищення поверхні щіткою та *розпилення рідкої композиції, її нанесення на поверхню матеріалу щіткою* — прості і недорогі способи, які відносяться до технологій поверхневого імпрегнування. Застосування таких технологій передбачає обмежену глибину проникнення (яка зазвичай становить від 2 і рідше до 7 мм залежно від матеріалу [56]) та утримання просочувального складу в товщі матеріалу, так як процеси імпрегнування у такому випадку базуються на величині капілярних ефектів, що протікають в КПС оброблюваних матеріалів. Крім того, застосування водовідштовхувальних складів часто призводить до створення ними паронепроникного бар'єру на поверхні зразка, затримуючи вологу усередині. Це може зумовити деградацію захисного поверхневого шару матеріалу через збільшення внутрішнього тиску внаслідок утворення пари. Поверхнєве просочування полягає у підвищенні міцності, щільності, морозостійкості, водонепроникності верхнього шару матеріалу завдяки проникаючим рідким складам, що заповнюють КПС. Такий метод імпрегнування часто знаходить застосування як технологія вторинного захисту гідротехнічних споруд з монолітного бетону [57]. Деякі із способів реалізації даної технології описані в роботах [57-61].

Спосіб швидкого занурення застосовується переважно для модифікації органічних будівельних матеріалів і може збільшити проникнення порівняно з розпиленням. Перебіг даного процесу, як і у попередньому випадку, полягає у капілярному підйомі просочувальних рідин. За даними [56] при застосуванні такого способу глибина проникнення просочувального складу може досягати більше 10 мм, а торцева частина заболоні сосни може бути імпрегнована рідиною на глибину в діапазоні 25 ... 75 мм.

Замочування є подібним до занурення методом, однак у даному випадку занурення відбувається протягом довшого часу. Тривалість занурення під час змочування вимірюється годинами, днями або тижнями. Технологію занурення

використовують для деревини, пиломатеріалів, бамбуку, рідше для бетонів та інших матеріалів мінерального походження [62-65]. Такий спосіб дозволяє збільшити глибину проникнення та рівень утримання просочувального розчину в матеріалі у порівнянні зі способами, описаними вище. У випадку обробки бетону гідрофобними рідинами таким способом, гідрофобні характеристики переважно буде на поверхні бетону або поблизу неї, при цьому основна частина матеріалу залишиться гідрофільною. Водовідштовхувальний шар також може бути чутливим до ультрафіолетових променів сонця і руйнуватися під їх дією. У випадку пошкодження або стирання поверхні матеріалу, його оголена внутрішня поверхня залишається гідрофільною. Таким чином, захист забезпечується до тих пір, поки поверхня зразка залишається непошкодженою, а покриття залишається неушкодженим [66, 67].

Ультразвукове (далі УЗ) імпрегнування часто застосовують для просочення епоксидними в'язучими волокнистими полімерними композиціями, які все частіше використовуються в будівництві [68]. Крім того, відомі застосування технологій з використанням УЗ для модифікації бетонних матеріалів, деревини. Залежно від вибору технологічних параметрів УЗ-імпрегнування може супроводжуватися кавітаційними явищами, які підвищують ефективність просочування матеріалів [68]. Деякі відомі методи УЗ-просочення можуть поєднуватися з технологічними операціями, наприклад, з вакуумуванням [69, 70]. Відомий спосіб вакуумного імпрегнування у поєднанні з УЗ обробкою, що використовується для розм'якшення деревини [70].

У роботі [71] описано метод імпрегнування для відновлення бетонних та залізобетонних конструкцій УЗ способом. Після висушування конструкції за температури 160 ... 180 °С протягом 8 ... 10 год та встановлення на бетонну поверхню просочувальної ємності з герметичною прокладкою по контуру, до неї подають просочувальну композицію під тиском інертного газу. Після заповнення камери просочувальною композицією, вмикають пристрій збудження УЗ коливань, частотою 22 кГц протягом 2 год, після чого залишки рідини зливають,

та закачують підігрітий теплоносієм для термокаталітичної полімеризації просочувальної композиції в товщі бетону. Дослідження [71] виявили достатньо високі показники глибини проникнення просочувального складу (до 26 мм).

Один із способів УЗ-імпрегнування передбачає занурення цементних матеріалів у ємність заповнену поліетиленгліколем (ПЕГ), яку розміщують в середині ультразвукового пристрою, де виконують ультразвукову обробку величиною 40 кГц [72]. Ультразвуковий вплив посилює проникання рідкого полімеру в цементні матеріали чим підвищує ефективність імпрегнування. У роботах [72, 73] провели порівняння результатів випробувань цементних зразків імпрегнованих ПЕГ декількома способами (рис. 1.6): методом занурення, вакуумним методом, а також УЗ імпрегнування.

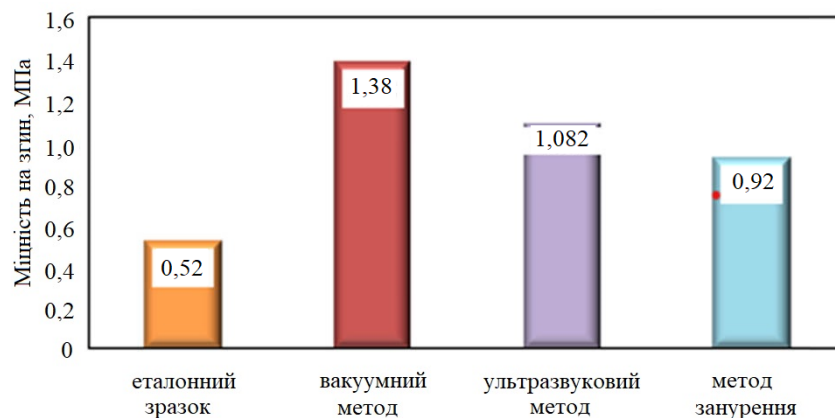


Рисунок 1.6 – Результати випробувань зразків на згин

Як видно із зображення, всі модифіковані зразки покращили свої міцнісні показники щодо згинальних сил. Зразки оброблені ультразвуковим (УЗ) імпрегнуванням досягли кращих результатів у порівнянні зі зразками отриманими методом занурення.

Аналізуючи роботи [71-74] можна дійти до висновку, що УЗ метод може бути ефективним у порівнянні з іншими способами імпрегнування без застосування тиску, проте використання УЗ коливань є менш ефективним відносно вакуумного імпрегнування матеріалів. Крім того, досягнення

достатньої глибини проникнення просочувальної композиції у матеріал з використанням даного способу є довготривалим та трудомістким.

Метод дифузії застосовується до мінеральних та органічних будівельних матеріалів. Даний метод є актуальним для деревини з високим вмістом вологи (понад 50 %). У такому разі консервант на водній основі (солі бору, сполуки фтору) у вигляді паст наноситься на поверхню деревини, де дифундує переважно в заболонь [53]. Дифузійний метод вогнезахисного просочення може бути реалізований шляхом нанесенні на поверхню деревини суміші антипірену з клейкою речовиною (пасті), що здатна збільшуватися в об'ємі [75]. У такому випадку рух антипіренів зумовлює осмотичний тиск, який виникає внаслідок різниці концентрацій солі в пасті та в сольовому розчині соку деревини. Крім того, технологія нанесення паст, лаків використовується для захисту металевих, а також бетонних будівельних конструкцій [76-78]. Переміщення речовин під час дифузії забезпечується градієнтом концентрації вздовж капілярно-пористого матеріалу, що спричиняє рух просочувального складу з місця нанесення, де він має більшу концентрацію, в товщу матеріалу, де концентрація просочувального складу є меншою. Недоліком цього методу є велика тривалість імпрегнування (до 140 діб), крім того, також часто недостатня глибина проникнення просочувальної рідини в товщу матеріалу, а також неможливість застосування даного методу для всіх просочувальних складів та матеріалів.

Метод гарячих і холодних ванн — це фізичні методи просочення, який полягає в послідовному зануренні матеріалу спочатку в гарячу, а потім у холодну просочувальну рідину. Цей процес використовується для покращення проникнення просочувального складу вглиб матеріалу за рахунок температурних коливань. В такому разі повітря в порах матеріалу, розміщеного у гарячій ванні, розширюється. Просочувальний склад проникає у матеріал завдяки частковому вакууму, який створюється за рахунок стиснення повітря після різкого занурення в холодну ванну [79-81]. Відомі способи та обладнання для застосування даної технології як для деревини [81, 82], так і для інших

типів [83, 84] капілярно-пористих матеріалів. Проте метод імпрегнації гарячих-холодних ванн має свої недоліки, які проявляються у високих енерговитратах, тривалості обробки та часто у недостатній глибині проникнення просочувальних складів у матеріал.

1.4.3 Імпрегнування під тиском

Способи просочування, що поєднують вакуум і тиск, є найбільш поширеними і вважаються одними із найбільш ефективних способів модифікації будматеріалів та виробів шляхом імпрегнування. Методи імпрегнації капілярно-пористих матеріалів під тиском поділяються на два основні типи: з повною камерою та з порожньою камерою залежно від їх повного чи часткового заповнення просочувальною композицією (імпрегнантом). На сьогоднішній день є відомими декілька різних технологій імпрегнування під тиском, які ми розглянемо далі (рис. 1.7).

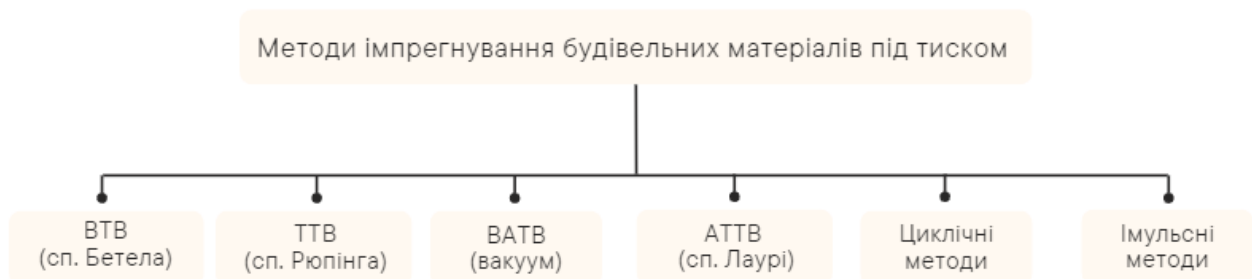


Рисунок 1.7 – Методи модифікації будівельних матеріалів імпрегнуванням з використанням тиску

Метод вакуум-тиск-вакуум (ВТВ) або відомий як спосіб Бетела відноситься до технології повнокамерного об'ємного поглинання. Після завантаження немодифікованих матеріалів в ємність для просочування (автоклав) процес обробки починається зі створення початкового повітряного вакууму (величина розрідження 80 ... 85 кПа) протягом 15 ... 35 хв залежно від виду матеріалу, його розмірів та проникності [85, 86]. Початкове вакуумування видаляє повітря, що

перешкоджає руху просочувальних складів. Потім ємність для просочування заповнюється просочувальним складом, і він починає проникати в пористу структуру матеріалу. Далі в автоклаві створюють надлишковий рідинний тиск величиною орієнтовно 700 ... 1500 кПа, який зазвичай прикладається протягом часу до 5 годин, але іноді й більше відповідно до проникності матеріалу та його поперечного перерізу [85, 86]. Під час витримування матеріалів під тиском просочувального складу досягається максимальна інтенсивність імпрегнування рідини у капілярно-пористі структури, тому тиск в автоклаві підтримується до тих пір, поки матеріали не будуть просочені до необхідної глибини або швидкість поглинання просочувального складу матеріалами стане досить малою. Після цього тиск знижують до атмосферного, а залишковий об'єм просочувальної рідини зливають з автоклава. Наступним кроком є створення остаточного повітряного вакууму з величиною розрідження близько 50 кПа протягом 5 ... 10 хв з метою уникнення ефекту віддачі та витікання просочувальних складів з поверхні оброблених матеріалів та їх підсушування. Після вакуумування тиск підвищують до атмосферного та проводять вивантаження модифікованих будівельних матеріалів (рис. 1.8).

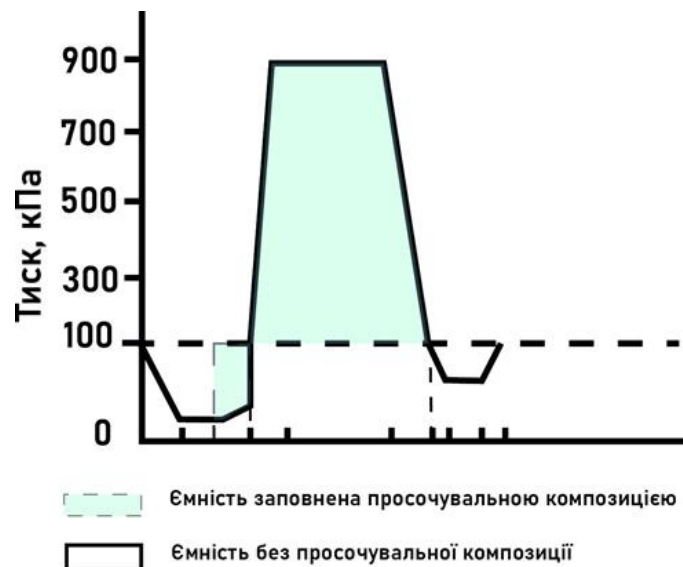


Рисунок 1.8 – Діаграма технології ВТВ

Метод ВТВ разом із додатковими технологічними процесами є однією із найпоширеніших технологій, що використовуються для модифікації або ремонту будівельних матеріалів та конструкцій через просочення. Дану технологію застосовують для обробки бетону, деревини, цегли, каменю, мармуру та інших капілярно-пористих матеріалів [66, 67, 85, 87, 88]. Відомі способи імпрегнування в яких процес завершального вакуумування може бути замінений на сушіння [89, 90]. В ролі просочувальних складів використовують антисептичні розчини на водній та олійній основі (креозотові оливи), мономери (метилметакрилат, фурфурол-ацетон), суміші алканів (зокрема парафін), епоксидні та поліефірні смоли, гідрофобізатори (кремнійорганічні сполуки, розплав сірки, бітумні емульсії, полівінілацетат). В залежності від типу просочувальної рідини передбачається її підігрівання для зниження їх в'язкості або введення додаткових компонентів або додаткових етапів обробки, наприклад, введення до просочених матеріалів нагрітого гліцерину для термokatалітичної полімеризації [91, 92] або виконання радіаційної обробки. Використання розчинів на водній основі може проводитися за кімнатної температури; застосування креозоту передбачає його підігрів до 60 ... 120°C; температура розплаву сірки може лежати в діапазоні 150 ... 200°C.

Завдяки використанню такого методу бетон просочується модифікуючим складом на глибину 1 ... 5 мм, в той час як для більш проникних матеріалів цей показник лежить в межах 3 ... 50 мм [86]. Консервація водонепроникної деревини (наприклад, сосни) може досягати 600 ... 700 кг/м³. При цьому методі утримання креозоту коливається від 50 ... 80 кг/м³ [53, 85].

Недоліками методу ВТВ є часто невисока якість кінцевої продукції, обумовлена недостатньою глибиною проникнення просочувального складу у товщу матеріалу, а також велика трудомісткість і великі енергозатрати, спричинені переважно значною тривалістю процесу обробки.

Метод тиск-тиск-вакуум (ТТВ) або спосіб Рюпінга відноситься до способів обмеженого поглинання з порожньою камерою, так як передбачає використання не лише рідинного тиску, а й тиску повітря. Дана технологія спочатку була

розроблена для збільшення глибини просочування деревини при обробці креозотом і має місце у використанні для цієї обробки донині. Імпрегнування відбувається у камері, де ініціюється тиском повітря, як правило, в діапазоні 200 ... 400 кПа протягом періоду від 10 до 15 хвилин залежно від проникності та розміру обробленої деревини [85, 93]. Далі просочувальним складом заповнюють ємність для імпрегнування без скидання тиску, після чого рідинний тиск підвищують до 800 ... 1400 кПа і витримують протягом заданого часу, залежно від матеріалу (рис. 1.9).

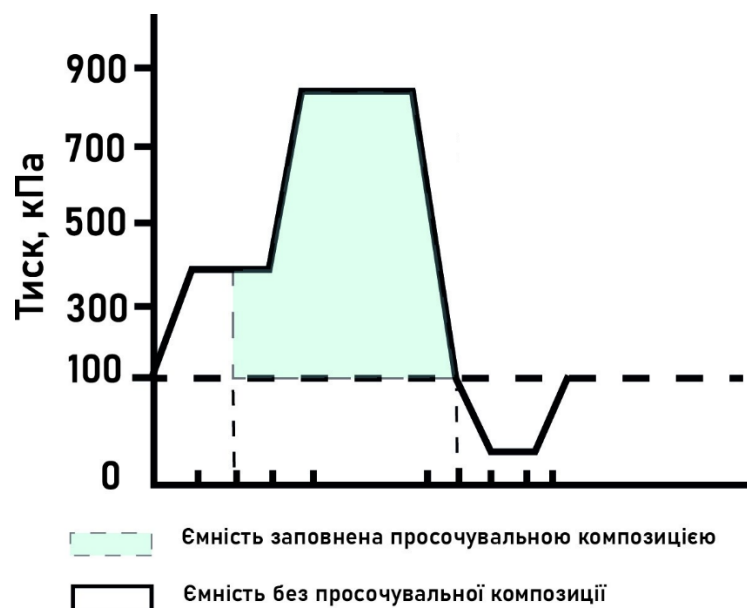


Рисунок 1.9 – Діаграма технології ТТВ

Після скидання тиску до атмосферного залишки просочувального складу зливають з автоклава. Далі застосовують остаточний вакуум величиною 50 ... 75 кПа протягом приблизно 10 ... 15 хв, щоб мінімізувати витікання просочувальної рідини з поверхні матеріалів [85]. Сумарний час імпрегнування за методом Рюпінга становить приблизно 200 ... 400 хв. Метод Рюпінга доцільно застосовувати для модифікації легкопроникних матеріалів. Технології Рюпінга була розроблена з метою зменшення утримання просочувальних рідин, тому деякі види деревини можуть мати 40 ... 50% максимального утримання просочувального складу [85]. Наприклад, утримування креозоту приблизно 250

кг/м³ може бути досягнуто за допомогою методу Бетела, але за допомогою методу Рюпінга утримання становитиме лише близько 110 кг/м³ за тієї самої глибини проникнення. Окрім економії просочувальних рідин, це може бути перевагою, в разі відсутності потреби у надлишку вмісту просочувальних складів в товщі матеріалу, наприклад, при застосуванні токсичних речовин.

Недоліками методу ТТВ є обмеженість використання і мала глибина проникнення просочувального складу у товщу матеріалу, при його застосуванні щодо матеріалів зі складною проникністю, наприклад, ялини, бетону тощо. Крім того, способи Бетеля та Рюпінга є досить затратними через тривалість імпрегнування та можуть бути ефективними, лише з попередньо обробленими висушеними матеріалами з достатньо низьким вмістом вологи (не більш як 20 ... 30% залежно від матеріалу).

Відомі технології, які поєднують в собі технологічні операції ВТВ та ТТВ. Наприклад, патентом [94] передбачається використання на першому етапі вакуумування з величиною розрідження 10 кПа з подальшим заповненням автоклава інертним газом і створенням тиску газу до досягнення 400 кПа протягом 10 ... 20 хв, причому з можливістю кількаразового повторення даного газообміну. Далі автоклав заповнюють агентом, розігрітим до 100 ... 110°C, і встановлюють рідинний тиск приблизно 700 ... 1000 кПа. На даному етапі відбувається міграція просочувального агента до матеріалів протягом періоду 150 ... 210 хв. Далі просочувальна рідина відкачується, а об'єм ємності для імпрегнування під тиском в діапазоні 200 ... 500 кПа, що випускається, заповнюється інертним газом. В автоклаві встановлюється негативний тиск і протягом приблизно 20 ... 30 хв відбувається вакуумування, щоб вивільнити та відкачати надлишок просочувальної композиції з матеріалу [94]. Під час процесу сушіння температура в автоклаві повинна бути приблизно від 60 ... 90 °C [94]. Після того, як модифікований матеріал буде достатньою мірою звільнений від надлишків просочувальної композиції, проводять розгерметизацію ємності для імпрегнування та видаляють готову продукцію.

До недоліків способів, що поєднують ВТВ та ТТВ відноситься складність обладнання, адже використання тиску повітря та рідинного тиску вимагає складних установок, включаючи компресори та вакуумні системи, що підвищує витрати на обладнання та його обслуговування, а також знижує надійність системи. Крім того, такі методи потребують значної кількості енергії для створення високого тиску та розрідження, що збільшує експлуатаційні витрати. Хоча дані технології дозволяють збільшити глибину просочування, проте це не завжди гарантує рівномірність проникнення просочувальної композиції, особливо в матеріалах з різною проникністю.

Вакуумний спосіб або вакуум-атмосферний тиск-вакуум (ВАТВ) відноситься до повнокамерних методів імпрегнування. Завдяки мінімізації кількості та повторюваності однакових технологічних процесів (рис. 1.10) метод ВАТВ є досить поширеним для імпрегнування різних капілярно-пористих матеріалів, в тому числі бетону [72, 85, 93, 95-100].

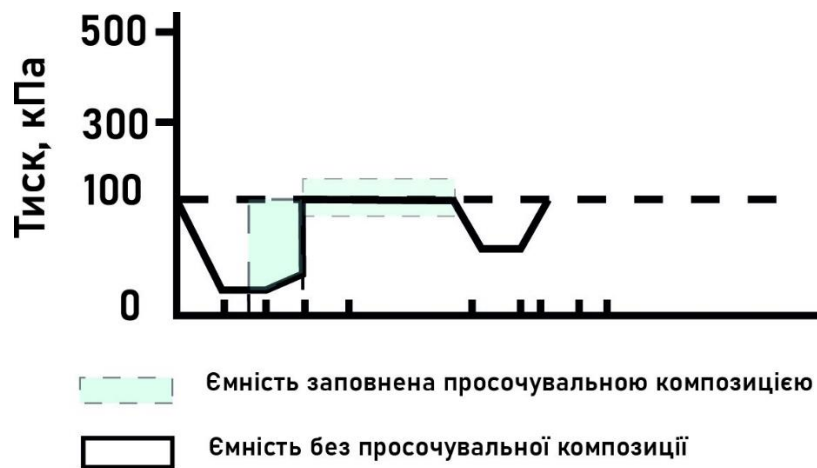


Рисунок 1.10 – Діаграма технології ВАТВ

Першим етапом даної технології є вакуумування зі створенням розрідження глибиною до 10 ... 80 кПа близько 10 ... 25 хв [85]. Підтримуючи розрідження, камера заповнюється просочувальним складом, після цього тиск піднімають до атмосферного і проводять витримку матеріалів під атмосферним тиском (етап безпосереднього просочення матеріалів) близько 60 ... 120 хв [85, 93].

Завершальним етапом є остаточне короткочасне вакуумування глибиною розрідження близько 80 кПа [85]. Проникнення просочувального складу у товщу матеріалів зумовлене різницею тисків, тобто різницею глибини вакуумування першого етапу та атмосферного тиску, тому величина розрідження на першому етапі вакуумування відрізняється від даного показника на завершальному етапі. Остаточне вакуумування виконують для підсушування зразків та витягування залишків просочувального складу.

До переваг даного способу відносять простоту технологічних процесів, та спрощену конструкцію обладнання, крім того, нижчі вимоги до конструкції просочувальної камери, так як немає потреби застосовувати високий тиск.

Однак, недоліки даного способу проявляються у достатньо низькій величині нагнітання просочувального складу до матеріалу (зазвичай це кілька міліметрів) [85, 93, 98], тому дана технологія відноситься до способів первинної обробки і застосовується при низьких вимогах до якості продукції або у випадках, коли матеріали не потребують великої глибини просочення. Крім того, слід зауважити, що під час завершального вакуумування стиснене в повітря, що може залишатися в порах матеріалу, виходить назовні та разом з цим виштовхує частину поглиненого просочувального складу.

Циклічні способи імпрегування мають багато варіантів через різні поєднання технологічних операцій. Серед них відомий *подвійний спосіб Рюпінга* — циклічна технологія ТТВ, що поєднує два одинарних послідовних способи Рюпінга із коротшим періодом часу фази просочення тиском. Другий цикл передбачає більшу величину тиску та довшу тривалість імпрегування. Даний спосіб переважно використовують для модифікації важкопроникної деревини, в тому числі дерев'яних шпал [93]. Крім того, відома також технологія «мокрого вакууму», яка передбачає циклічне повторення процесів вакуумування, створення надлишкового тиску, тобто циклічний спосіб ВТВ [93]. Такі способи здебільшого збільшують глибину проникнення та поглинання просочувальних складів капілярно-пористими матеріалами в порівнянні.

Однак, застосування циклічних методів імпрегнування може призводити до збільшення тривалості обробки. Крім того, потребує подальших досліджень визначення параметрів режимів роботи просочувального обладнання в залежності від матеріалів та просочувальних композицій.

Метод Лоурі (тиск-вакуум (ТВ) або атмосферний тиск-тиск-вакуум) відноситься до способів імпрегнування з порожньою камерою. Даний спосіб призначений для максимальне проникнення просочувальної композиції вглиб матеріалу водночас з її низьким утриманням у матеріалі. Даний метод базується на використанні атмосферного тиску на першому етапі з подальшим заповненням камери автоклава просочувальною композицією і створенням надлишкового тиску, який може досягати 900 ... 1500 кПа [101, 102] з певним періодом витримки. Наступним етапом відбувається злив залишків просочувального складу та вакуумування імпрегнованих матеріалів. Даний метод використовується для імпрегнування матеріалів з деревини та бетону, але більш ефективним є при застосуванні для водопроникної деревини, такої як сосна [53, 93]. До недоліків технології ТВ відносять ті, що стосуються і технологій ВТВ, ТТВ, однак слід також зауважити про досить обмежене використання методу Лоурі для різних матеріалів залежно від їх проникності.

Існує ряд інших способів модифікації будівельних матеріалів шляхом їх імпрегнування під тиском, що є менш відомими та недостатньо вивченими. До них відносяться такі методи: осьовий, каскадний, а також технологія імпульсного імпрегнування [103, 104].

Методи імпульсного імпрегнування передбачають багаторазове застосування імпульсів тиску рідини. Технології можуть включати циклічне застосування імпульсів високого тиску з почерговим створенням вакууму для кращого нагнітання просочувальної композиції в щільну КПС [104, 105].

Методи імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів на даний момент є недостатньо дослідженими, і потребують подальших наукових досліджень та експериментальних підтверджень для повного розуміння їх потенціалу та обмежень. Даний спосіб має потенціал щодо зниження часу

обробки, покращення показників проникності просочувальних композицій в об'єм матеріалів, зокрема, важкопроникних КПТ, таких як бетон, а отже, є перспективним для вивчення.

1.5 Аналітичний огляд відомих пристроїв та устаткування, що використовуються для імпрегнування будівельних матеріалів та виробів

Устаткування для модифікації будівельних матеріалів та виробів шляхом імпрегнування можна розділити на:

- пристрої для розпилення, обприскувачі [106, 107] або установки зі щітками [108], які використовуються для поверхневого нанесення, обмазування [109] просочувальною композицією матеріалу і реалізують проникнення імпрегнанта через процеси дифузії та капілярного всмоктування;
- апарати [62, 103, 110] з можливістю занурення, переміщення матеріалів, підігріву та охолодження просочувальних складів, просочувальні ванни, які підлягають використанню у таких способах обробки матеріалів як: метод занурення, метод гарячих-холодних ванн тощо;
- установки з камерами, обладнані генераторами ультразвукових коливань [70, 111], що реалізують технологію ультразвукового імпрегнування матеріалів;
- автоклавне устаткування разом із допоміжними компонентами [93, 112-119], яке знайшло використання у технологіях імпрегнування матеріалів із застосуванням тиску.

Оскільки найбільш популярними та ефективними є методи імпрегнування з використанням тиску, то аналізу саме автоклавних пристроїв для реалізації даних методів буде приділено найбільше уваги. Такий підхід часто поєднує в собі використання процесів вакуумування, створення надлишкового тиску, нагрівання, сушіння. Найбільш широко розповсюджуваними є установки, що

реалізують згадані технології ВТВ, ТТВ та ВАТВ та їхні варіації з точковими доповненнями або заміною технологічних операцій. Аналізуючи пристрої [93, 97, 112-119], було узагальнено основні елементи обладнання та зведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Основні комплектуючі імпрегнаторів

№	Обладнання	Функції	Опис, характеристики
1	Просочувальна камера (автоклав)	Герметична камера для проведення процесу імпрегнування	Підсилена конструкція, часто теплоізольована. Тиск: до 800 ... 1600 кПа; Об'єм: 4 ... 20 м ³ ; Довжина: 4000 ... 8000 мм; Діаметр: 1000 ... 2500 мм
2	Вакуумний насос	Створює розрідження для видалення повітря з матеріалу, видалення залишків просочувального складу, підсушування поверхні матеріалу	Вакуум: до 50 ... 85 кПа; Продуктивність: залежить від об'єму автоклава
3	Повітряний компресор	Забезпечує тиск повітря для початкового на етапі просочування	Тиск: 200 ... 1500 кПа; Продуктивність: залежить від об'єму автоклава
3	Рідинний насос (насоси)	Забезпечують переміщення просочувального складу, створюють високий рідинний тиск	Тиск: 800 ... 1500 кПа; Продуктивність: залежить від автоклава
4	Ємності для зберігання рідини	Зберігають і готують просочувальний склад до переміщення автоклав. Сюди ж відносяться маневрові та інші резервуари	Об'єм: залежить від потреб установки; Фільтрація для уникнення забруднення рідини. Можуть оснащуватися системою перемішування
5	Система нагрівання	Підвищує температуру просочувального складу до робочої	Температура: до 60 ... 120°C, в залежності від матеріалу
6	Контрольно-вимірвальні прилади	Вимірюють тиск, вакуум, температуру витрату просочувального складу, рівень рідини в резервуарах	Манометри, вакуумметри, термометри та інші прилади, відповідні до параметрів системи
7	Система трубопроводів та запірно-регулююча арматура	Сполучення всіх резервуарів та пристроїв живлення	Трубопроводи, зворотні клапани, запобіжні клапани, дихальні клапани, запірні крани та інше
8	Система управління	Контролює етапи вакууму та тиску, забезпечує автоматизацію процесу імпрегнування	Автоматизоване управління часом і тиском на кожному етапі обробки

Обладнання, що реалізує технологію ВТВ і ТТВ має багато спільних конструктивних елементів, однак існує ключова відмінність між цими пристроями, яка визначається технологічними аспектами і залежить від ступеня заповнення просочувальної камери. Зовнішній вигляд установки для імпрегнування капілярно-пористих матеріалів та виробів китайського виробництва Henan Taigu Boiler Products Co представлено на рис. 1.11.



Рисунок 1.11 – Імпрегнатор Henan Taigu Boiler Products CO

Апарати, що працюють за принципом ВТВ з повною просочувальною камерою, оснащують потужнішими рідинними насосами, здатними створювати рідинний тиск близько 1,5 МПа, в той час як пристрої, що реалізують неповнокамерний спосіб ТТВ ця роль відводиться компресорному обладнанню.

Варто відзначити, що сьогодні доступні пристрої, що вирізняються своєю універсальністю та можуть працювати, використовуюючи обидві технології, а також поєднувати інші додаткові технологічні операції.

Принципові схеми обладнання для імпрегнування будівельних матеріалів та виробів, що працюють за методами ВТВ і ТТВ представлено на рис. 1.12, 1.13.

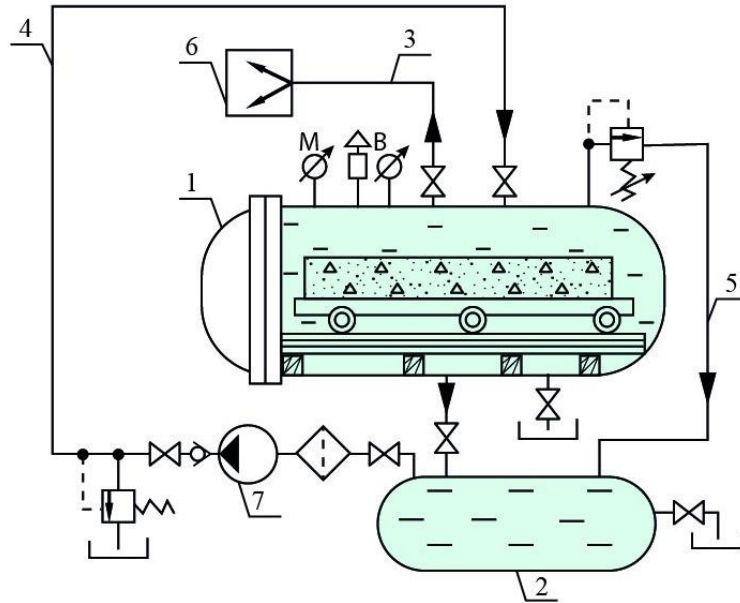


Рисунок 1.12 – Принципова схема імпрегатора за способом ВТВ:

1 – просочувальна камера, 2 – ємність з імпрегнантом, 3 – вакуумна лінія, 4 – лінія нагнітання імпрегнанта, 5 – зливна лінія, 6 – вакуумний насос, 7 – рідинний насос.

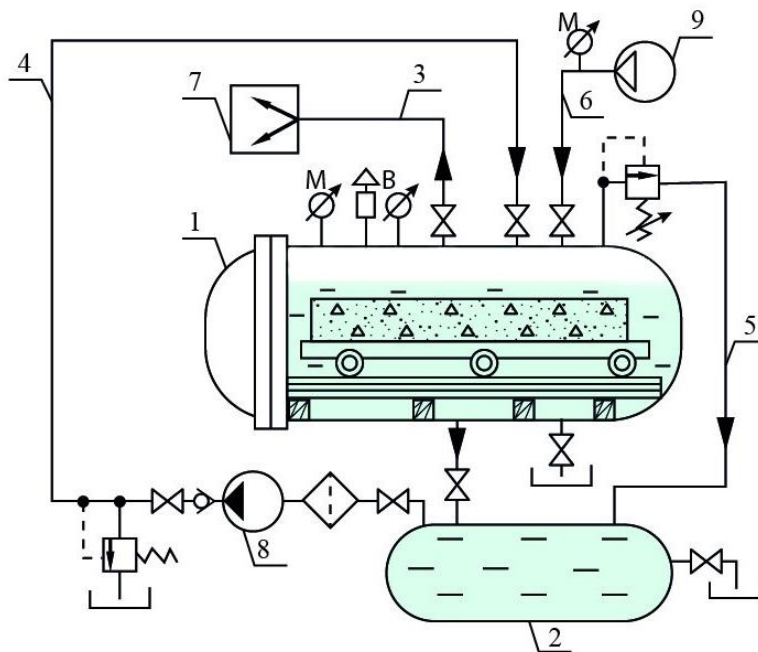


Рисунок 1.13 – Принципова схема імпрегатора за способом ТТВ

1 – просочувальна камера, 2 – ємність з імпрегнантом, 3 – вакуумна лінія, 4 – лінія нагнітання імпрегнанта, 5 – зливна лінія, 6 – лінія нагнітання повітря, 7 – вакуумний насос, 8 – рідинний насос, 9 – компресор.

Одним з основних недоліків властивих автоклавному обладнанню є значна енергоємність. Процеси, що протікають в установках потребують значних витрат енергії для створення тиску і вакууму, а також для нагріву просочувального складу, що часто є необхідним. Це підвищує витрати на експлуатацію, особливо при тривалих циклах обробки. Тривалість імпрегнування в таких пристроях може досягати 5 год і більше для матеріалів з низькою проникністю. Це зменшує продуктивність і збільшує загальний час обробки.

Сучасні тенденції в розвитку обладнання для імпрегнування будівельних матеріалів із застосуванням тиску спрямовані на підвищення ефективності процесів, автоматизацію, поліпшення енергоефективності роботи устаткування. Основними напрямками сучасного розвитку є впровадження сучасних комп'ютеризованих систем керування, що включають програмовані контролери та спеціалізоване програмне забезпечення, які дають змогу точно контролювати та керувати параметрами процесів обробки будівельних матеріалів, а саме: показники величин тиску та розрідження, температури, витрати просочувальної композиції, тривалості обробки. На сьогодні залишається актуальним питання налаштування та адаптації параметрів різних режимів роботи устаткування до різних матеріалів та просочувальних складів для забезпечення їх оптимального протікання процесів імпрегнування у кожному випадку.

Підвищення енергоефективності сучасних імпрегнаторів може бути досягнена за рахунок використання вакуумних, компресорних систем, а також рідинних насосів з підвищеним ККД, а також з тривалішим робочим ресурсом. Використання систем рекуперації тепла, які повторно використовують тепло, виділене під час процесу, для нагрівання просочувальних рідин або обігріву приміщення також дозволяє значно скоротити витрати енергії. Оптимізація процесів обробки будівельних матеріалів, яка спрямована на скорочення тривалості імпрегнування, дозволить зменшити загальні витрати енергії та підвищити продуктивність без втрати якості модифікованих матеріалів.

Автоклавне устаткування для імпрегнування будівельних матеріалів, зокрема те, що призначене для реалізації технологій ВТВ, ТТВ та їх похідних

дозволяє досягти високої якості матеріалів. Надійність та універсальність даного обладнання робить його перспективним у використанні, модернізації та адаптації під конкретні технологічні вимоги.

1.6 Вплив різних просочувальних композицій на властивості модифікованих будівельних матеріалів

Просочувальні композиції — це спеціальні рідкі склади, які використовуються для проникнення у структуру будівельних матеріалів та виробів з метою модифікації цих матеріалів через поліпшення їх властивостей або захисту від зовнішніх впливів. Просочувальні склади або імпрегнанти можуть виконувати різні функції залежно від складу і призначення (рис. 1.14). Просочувальні композиції застосовуються у виробництві та будівництві для модифікації різних матеріалів, таких як дерево, бетон, камінь, і значно продовжують їх термін служби, підвищуючи експлуатаційні характеристики.

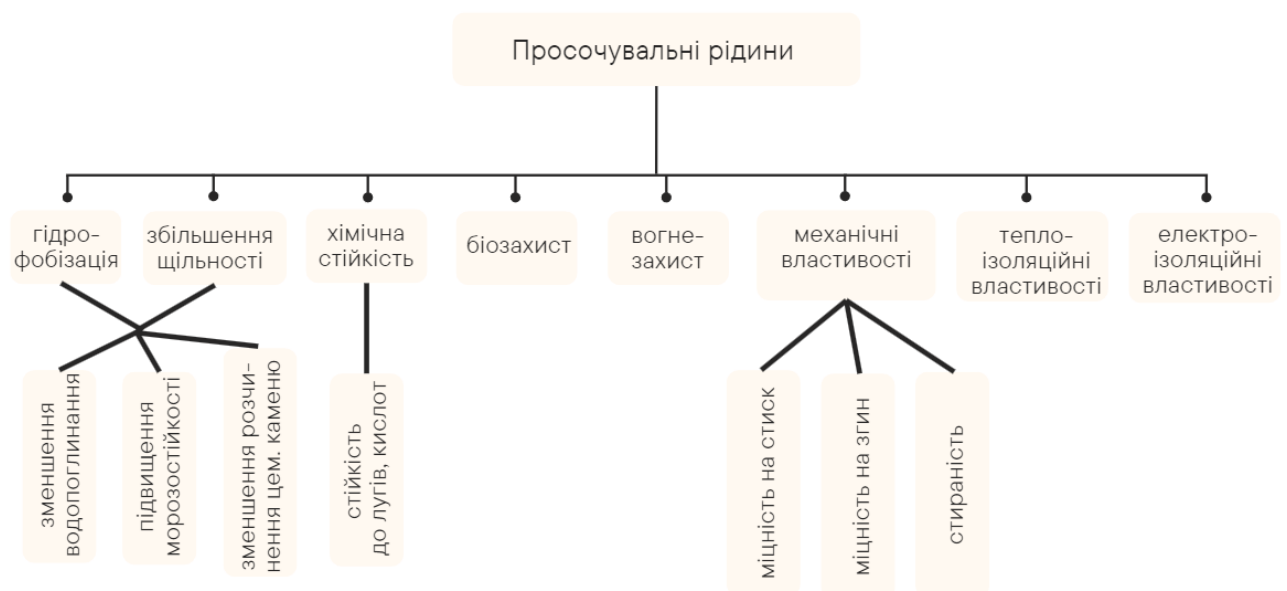


Рисунок 1.14 – Вплив просочувальних складів на властивості КРТ

Одним із напрямків покращення властивостей матеріалів є гідрофобізація, тобто різке зниження здатності матеріалів та виробів змочуватися водою і

водними розчинами, зберігаючи паро- та повітропроникність. В ролі гідрофобізаторів набули широкого використання силоксани, силани, фторвмісні полімери, проникають у пори бетону і утворюють на їхніх стінках гідрофобний шар. Роботи [120, 121] показують, що використання кремній-органічних сполук дозволяє створити ефективний гідрофобний захист для різних будівельних матеріалів, наприклад, використання гідрофобного покриття бетонних зразків ГКЖ-94 сприяло багаторазовому зменшенню деформацій зразків при заморожуванні. В роботах [123, 124] розглянуто можливість використання полімерних сполук для надання гідрофобних та вдосконалення механічних властивостей. У гідрофобізованому бетоні знижене водопоглинання призводить до меншого ризику утворення тріщин, які можуть бути спричиненіми гідратацією та висиханням. Крім того, зменшується об'ємна деформація бетону, що сприяє збереженню цілісності будови виробу. Запобігання насиченню водою КПС бетону сприяє підвищенню його морозостійкості.

Найбільш помітна зміна властивостей матеріалів на цементній основі спостерігається при застосуванні полімерних композицій. Процеси імпрегнування є невід'ємною складовою виробництва бетонополімерів або polymer impregnation concrete (PIC), які володіють високими механічними властивостями (підвищена міцність на стиск та на згин, стиранисть), водовідштовхувальними властивостями, є довговічними, стійкими до хімічної корозії, а також мають значну морозостійкість. Крім бетонів, полімерній модифікації шляхом імпрегнування підлягає деревина, цегла, природний камінь. У даному контексті поширення набули розплав сірки, полімерна сірка, метилметакрилат (ММА), стирол.

Для просочування будівельних матеріалів часто використовують бітуми смоли. Для біологічного захисту використовують водорозчинні та маслянисті антисептики. До водорозчинних відносять неорганічні і деякі органічні, які використовують у вигляді розчинів. Це солі та водорозчинні смоли: фторид натрію, кремнефторид натрію, препарати суміш хлориду цинку і натрієвого або калієвого хромату, а також органорозчинні препарати пентахлорфенол, парафін.

Дослідження [125] показують, що застосування парафіну для імпрегнування ніздрюватих бетонів, таких як газо- та пінобетони, позитивно впливає на їх теплові характеристики. Дослідження [126] показали позитивний вплив на конфігурацію пор і пористості бетону після його імпрегнування аерогелем.

1.7 Задачі дослідження

Проведений аналітичний огляд літературних джерел показав, що покращення фізико-механічних властивостей будівельних виробів із бетону шляхом імпрегнування просочувальними композиціями, зокрема імпульсні методи імпрегнування, є перспективним напрямком науково-дослідної діяльності. У порівнянні з іншими напрямками досліджень, методи імпульсного імпрегнування бетону станом на сьогодні є недостатньо вивченими.

Гіпотеза дослідження полягає у ефективному подоланні сил опору капілярно-пористого середовища тиском просочувальної композиції завдяки застосуванню імпульсів тиску рідини. Як наслідок, збільшення проникності капілярно-пористого тіла дозволяє збільшити глибину імпрегнування та покращити рівномірність заповнення його об'єму. В результаті відкривається можливість досягнення високої якості модифікованих виробів з бетону, завдяки покращенню їх фізико-механічних властивостей.

Мета роботи — модифікація будівельних виробів із бетону для покращення фізико-механічних властивостей шляхом імпульсного імпрегнування їх капілярно-пористої структури.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні завдання:

- визначити вплив різних просочувальних композицій на фізико-механічні властивості будівельних виробів із бетону модифікованого способом імпульсного імпрегнування;

- виконати математичне моделювання процесів проникнення просочувальних композицій в капілярно-пористу структуру бетону під час імпульсного імпрегнування;
- розробити нову енергоефективну технологію для модифікації будівельних матеріалів шляхом імпульсного імпрегнування;
- розробити принципові та конструктивні схеми прототипів обладнання та обрати оптимальний варіант конструкції устаткування для імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів.

1.8 Висновки до розділу 1

Встановлено, що капілярно-пориста структура будівельних матеріалів та виробів, яка проявляється у геометричних формах, розмірах та розподіленні пор по об'єму тіла, має суттєвий вплив на його властивості. Найбільший ступінь впливу на фізико-механічні характеристики бетону, такі як міцність, водопоглинання, морозостійкість виявляють макропори, розмір яких може знаходитися в діапазоні від 50 мкм до 2-5 мм.

Визначено основні руйнівні чинники, що погіршують експлуатаційні характеристики бетонних виробів, серед яких однією з основних є руйнування структури внаслідок процесів заморожування-відтавання.

Аналіз існуючих методів модифікування будівельних матеріалів та виробів капілярно-пористої будови, зокрема способів покращення властивостей бетонів шляхом імпрегнування просочувальними складами показав, що до основних недоліків таких методів можна віднести: нерівномірність та неоднорідність проникнення просочувального складу в структуру матеріалу, недостатню глибину імпрегнування просочувальної складу в товщу матеріалу, велику тривалість імпрегнування, недостатньо високу якість модифікованих будівельних матеріалів (міцність, водопоглинання, хімічна та біологічна стійкість тощо), велику трудомісткість, великі енергозатрати при обробці

матеріалів, обмеження використання методів стосовно важкопроникних матеріалів. На основі здійсненого аналізу визначено найбільш ефективний та перспективний метод модифікації будівельних матеріалів шляхом імпрегнування із застосуванням тиску, а саме обробка будівельних матеріалів методом імпульсного імпрегнування.

Проведено аналіз відомих принципів та конструктивних схем та відомих пристроїв для імпрегнування капілярно-пористих будівельних матеріалів. В результаті було визначено, що існуюче обладнання для імпрегнування будівельних матеріалів є недосконалим і має ряд недоліків: велику тривалість робочого процесу, значні витрати електричної енергії, невисоку продуктивність роботи, недосконалості у конструкції. Встановлено, що найбільш перспективними є устаткування, робота якого полягає у використанні автоклавної обробки, тобто імпрегнування матеріалів із застосування тиску. Конструктивними особливостями таких пристроїв є наявність просочувальної камери, резервуарів для зберігання і підготовки просочувальних складів, компресорні установки, насосне та теплогенеруюче обладнання.

З огляду на це виникає потреба та актуальність у ґрунтовному дослідженні процесів імпульсного імпрегнування та у вдосконаленні технології та обладнання для імпульсного імпрегнування будівельних виробів із бетону.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИКОРИСТАНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Мета та задачі експериментальних досліджень

Важливим розробки технології та обладнання для імпульсного імпрегнування є проведення експериментального дослідження. Основною метою проведення експерименту є дослідження впливу просочувальних композицій на якість будівельних виробів з бетону після його модифікації імпульсним способом, при цьому, якість модифікованих виробів визначається їх фізико-механічними характеристиками. З огляду на це, було виділено наступні основні завдання експериментальних досліджень:

- виконати виготовлення та визначити параметри дослідних зразків, враховуючи характеристики вихідних матеріалів;
- сконструювати та змонтувати експериментальний стенд для реалізації запропонованого способу імпульсного імпрегнування;
- розробити методику проведення експериментальних досліджень та планування багатofакторного експерименту з врахуванням необхідності порівняння декількох методів імпрегнування бетону;
- випробувати дослідні зразки для визначення, збору та обробки показників водопоглинання, глибини проникнення просочувального складу, міцності на стиск та міцності на згин.

2.2 Характеристики вихідних матеріалів

В'яжучим компонентом для приготування дослідних зразків слугував загальнобудівельний бездомішковий портландцемент ПЦ І-500 Кам'янець-Подільського цементного заводу, вибір якого обумовлений відповідністю даного

цементу вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010 [127], ДСТУ Б EN 197-1:2015 [128], а також високим попитом на його використання. Фізико-механічні характеристики використовуваного портландцементу наведені в таблиці 2.1, хімічний та мінералогічний склад представлений в таблицях 2.2, 2.3 .

Таблиця 2.1

Фізико-механічні характеристики портландцементу

Компо- нент	Нормальна густина цементного тіста, %	Істинна густина, г/см ³	Насипна густина, кг/м ³	Час тужавіння, год		Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа
				початок	кінець	
ПЦ І-500	24	3,1	1200	1,4	4,0	49,4

Таблиця 2.2

Хімічний склад портландцементу

Компо- нент	Вміст оксидів, %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MnO	MgO
ПЦ І-500	25,5	3,8	2,18	0,2	66,3	0,52	1,5

Таблиця 2.3

Мінералогічний склад портландцементу

Компо- нент	Вміст мінералів, %			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
ПЦ І-500	49,1	39,2	5,3	6,4

Дрібним заповнювачем для виготовлення дослідних зразків бетону слугував Дніпровський кварцовий пісок, що відповідає ДСТУ Б В.2.7-32-95 [129]. Модуль крпуності піску $M_{кр}=1,34$, середня густина 1420 кг/м³, пустотність 42%, істинна густина 2,63 г/см³. Хімічний та гранулометричний склад піску наведено у таблицях 2.4, 2.5.

Таблиця 2.4

Хімічний склад піску

Компонент	Вміст оксидів, %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	в.п.п.
Кварцевий пісок	98,0	0,6	0,1	0,2	0,4	0,1	0,1	0,5

Таблиця 2.5

Гранулометричний склад піску

Залишки в ситах	Вміст залишків, %				
	Розміри отворів сита, мм				
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14
Часткові	0,6	0,9	1,5	83,4	13,5
Повні	0,6	1,5	3,0	86,4	99,9

Для замішування бетонної суміші була використана вода водопровідна відповідно до ДСТУ Б В.2.7-273:2011 [130].

Крупним заповнювачем для виготовлення дослідних зразків бетону слугував гранітний щебінь Гніванського кар'єру, що відповідає ДСТУ Б В.2.7-75-98 [131]. Для виготовлення дослідних зразків було використано щебінь крупністю 5-10 мм.

У ході проведення досліджень використовували два різновиди просочувальних композицій (рис. 2.1). Силіконовий гідрофобізатор виробника ТОВ «Фасад», що відповідає ДСТУ Б В.2.7-233:2010 [132], виготовлений на основі силіконового еластомеру водний розчин метилсиліконату калію (46%). Скло рідке натрієве (Na₂OSiO₂) ТМ «Мальва» ТОВ ПП «ЗІП» виготовлене згідно ТУ У 21875464.0044-98 використовувалось як просочувальний агент для поліпшення міцності зразків. Характеристики просочувальних композицій наведені в табл. 2.6.



а)

б)

Рисунок 2.1 – Просочувальні композиції:

а) силіконовий гідрофобізатор; б) рідке натрієве скло.

Таблиця 2.6

Характеристики просочувальних композицій

Параметр	Na ₂ O, %	SiO ₂ , %	Густина, г/см ³
Силіконовий гідрофобізатор	-	-	1,01 ... 1,02
Рідке скло натрієве	8 ... 13,3 (12,5)	24,1 ... 35 (32,7)	1,36 ... 1,50 (1,4)

2.3 Параметри дослідних зразків

Дослідні зразки виготовлялися у вигляді балочок розміром 4×4×16 см. Бетонні зразки було виготовлено з водоцементним відношенням В/Ц = 0,5 та відношенням цементу до заповнювача Ц/З = 1:5,5. Формування зразків виконувалося у металевих розбірних формах. Ущільнення бетонних зразків проводили штикуванням та вібруванням з використанням ручного вібратора. Розпалубку проводили через 14 діб після формування (рис. 2.2).

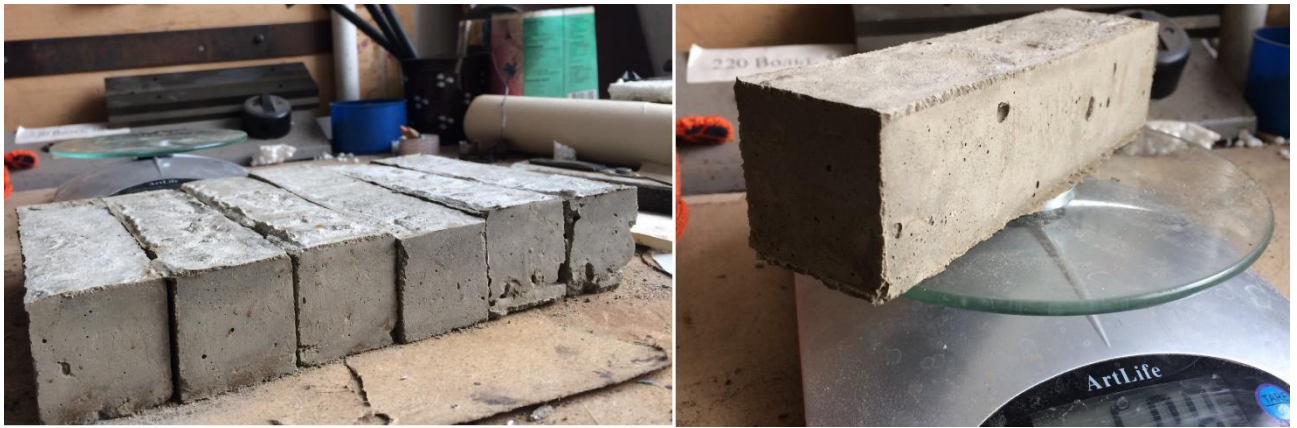


Рисунок 2.2 – Дослідні зразки у віці 14 діб

Дослідні зразки виготовлялися і зберігалися в лабораторних умовах НДЛ Гідродинаміки ВНТУ з терміном тверднення 28 діб за температури 20 ± 3 °C та відносної вологості повітря в приміщенні 60 ... 70% (рис. 2.3). Склад бетону для виготовлення дослідних зразків наведено в табл. 2.7.



Рисунок 2.3 – Дослідні зразки у віці 28 діб

Таблиця 2.7

Витрата компонентів на приготування 1 м³ бетону дослідних зразків

Компоненти	Кількість, кг
Портландцемент ПЦ І-500	340
Пісок	650
Щебінь крупності 5-10 мм	1220
Вода	170 (л)

2.4 Експериментальний стенд

Для досягнення поставлених завдань та здійснення експериментальних досліджень в НДЛ Гідродинаміки ВНТУ було сконструйовано і змонтовано експериментальний стенд (рис. 2.4).

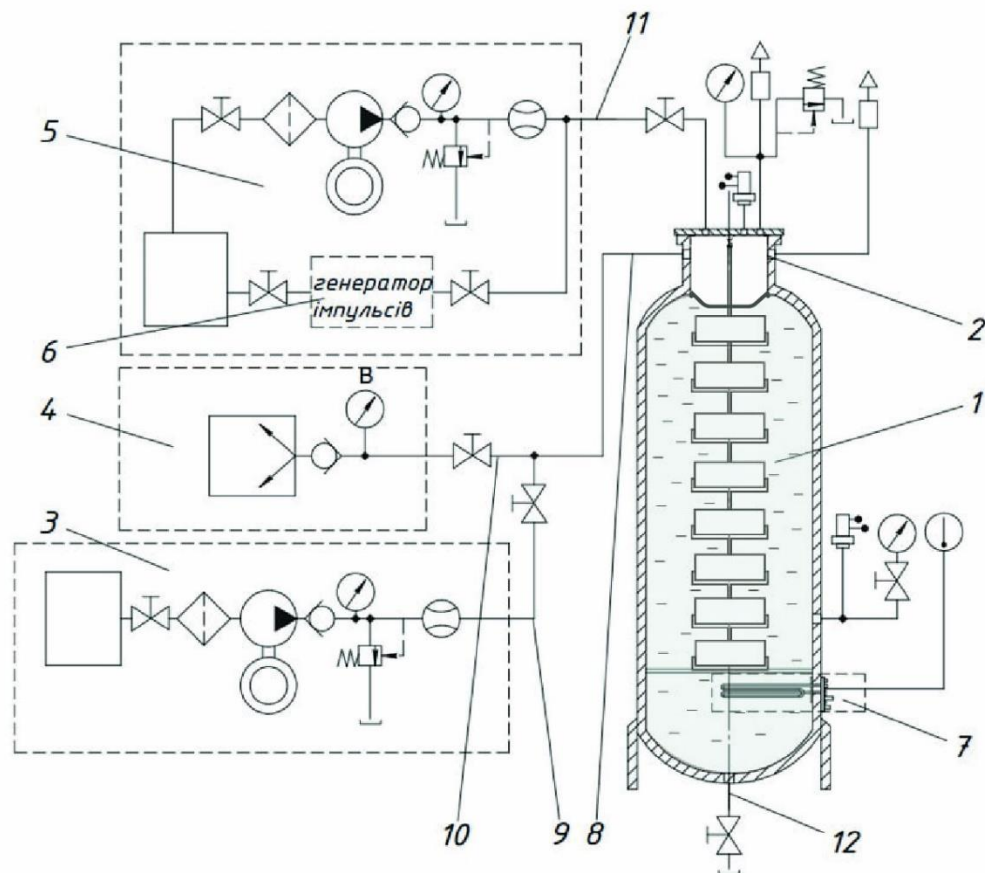


Рисунок 2.4 – Принципова схема експериментального стенда

Робоча (просочувальна) камера 1, яка заповнюється просочувальною композицією, містить розвантажувальний люк і виконана з можливістю герметичного закривання. Усередині робочої камери 1 влаштовано еластичну мембрану 2 з можливістю передачі ударних імпульсних коливань рідинному середовищу просочувальної композиції. Робоча камера 1 сполучена через магістраль 8 і напірний трубопровід 9 з насосною станцією для подачі просочувальної композиції 3, а через магістраль 8 і вакуумну лінію 10 з вакуумним насосом 4 для відкачування повітря та створення розрідження у робочій камері 1. Крім того, робоча камера 1 сполучена через гідролінію 11 з обладнанням для створення імпульсів тиску рідини (гідроімпульсним обладнанням) 5, до складу якого входить, зокрема, рідинний насос, запірно-регулююча арматура та генератор імпульсів 6, який представлений у вигляді гідравлічного розподільника. Робоча камера 1 також включає зливний трубопровід 12, призначений для зливу залишків просочувальної композиції. Окрім того, експериментальний стенд містить запірно-регулюючу арматуру, яка представлена у вигляді засувки, зворотних, запобіжних, дихальних клапанів, фільтрів, а також контрольно-вимірювальні пристрої, що представлені манометрами, термометром, вакууметром, давачами тисків, блоком регулювання температури 7.

Вимірювання параметрів роботи випробувального стенда здійснювалося наступна вимірювальна, реєстраційна апаратура та прилади:

- Сенсор тиску фірми “Метронік” типу “Карат” - ДІ (заводський № 07355).
- Сенсор тиску фірми “Метронік” типу “Карат” - ДІ (заводський № 08731).
- Зразковий манометр для тарування сенсорів тиску, верхня межа вимірювання 160 кг/см^2 , діаметр корпусу 160 мм, клас точності 1 (заводський № 59166).
- Мановакууметр 37 типу ОБМВ1-160, верхня межа $(-0,1+0,3) \text{ МПа}$, діаметр шкали 160 мм, клас точності 1,5 (заводський № 1033534).

- Манометр 22 типу ОБМ-160, верхня межа 1,6 МПа, діаметр шкали 160 мм, клас точності 1,6 (заводський № 613661).
- Манометр 22 типу ОБМ-160, верхня межа 1,6 МПа, діаметр шкали 160 мм, клас точності 1,6 (заводський № 879414).
- Манометр 22 типу ОБМ-160, верхня межа 1,6 МПа, діаметр шкали 160 мм, клас точності 1,6 (заводський № 98418).
- Манометр 22 типу ОБМ-160, верхня межа 1,6 МПа, діаметр шкали 160 мм, клас точності 1,6 (заводський № 613725).
- Термометр біметалевий радіальний фірми «АРС-плюконтроль» типу ТБУ-63/150, діапазон вимірювань 0 ... +120 °С, діаметр шкали 63 мм, клас точності 1,5 (заводський № 15144).

Складові лабораторної установки відображені на рис. 2.5, 2.6.



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд експериментального стенда



Рисунок 2.6 – Вакуумний насос ЗНВР-1Д

2.5 Методика проведення експериментальних досліджень

Для експериментальних досліджень імпрегнування бетонних зразків застосовували такі просочувальні композиції: силіконовий гідрофобізатор та рідке натрієве скло. Дослідження проводили у два етапи з метою порівняння властивостей зразків модифікованих запропонованою новою технологією імпульсного імпрегнування зі зразками, які підлягали просочуванню відомим способом вакуум-тиск-вакуум, а також з контрольними зразками, які не підлягали обробці. Обидва етапи передбачали обробку дослідних зразків двома способами: відомим способом ВТВ, а також запропонованим способом імпульсного імпрегнування. На першому етапі проводили імпрегнування бетонних зразків рідким силіконовим гідрофобізатором, на другому етапі виконували імпрегнування інших бетонних зразків рідким натрієвим склом.

Перший етап — імпрегнування бетонних дослідних зразків силіконовим гідрофобізатором. Обробку дослідних зразків першим способом ВТВ виконували з наступними операціями:

- Розміщення дослідних зразків в робочій камері.

- Герметизація робочої камери.
- Створення розрідження у робочій камері з розміщеними у ній дослідними зразками.

- Заповнення робочої камери просочувальною композицією (гідрофобізатором) одночасно з підвищенням тиску до атмосферного.

- Створення рідинного надлишкового тиску — імпрегнування зразків.
- Встановлення атмосферного тиску і зливання просочувальної композиції.
- Повторне вакуумування.
- Розгерметизація установки і видалення дослідних зразків.

Глибину початкового і завершального розрідження встановлювали 85 кПа протягом 5 хв. Величина надлишкового тиску просочувальної рідини складала 1200 кПа, а стадія імпрегнування під тиском тривала 10 хв.

Обробку дослідних зразків другим способом імпульсного імпрегнування було здійснено з використанням інших бетонних зразків із застосуванням таких операцій:

- Розміщення дослідних зразків в робочій камері.
- Герметизація робочої камери.
- Створення розрідження у робочій камері з розміщеними у ній дослідними зразками.

- Заповнення робочої камери просочувальною композицією (гідрофобізатором) одночасно з підвищенням тиску до атмосферного.

- Встановлення рідинного надлишкового тиску.
- Створення імпульсів тиску рідини в робочій камері.
- Припинення генерації імпульсів та встановлення статичного надлишкового тиску.

- Зниження величини тиску до атмосферного і зливання просочувальної композиції.

- Повторне вакуумування.
- Розгерметизація установки і видалення зразків.

Параметри початкового і завершального вакуумування залишали такими ж як і у першому випадку, при обробці відомим способом ВТВ (85 кПа протягом 5 хв). Величина статичного надлишкового тиску просочувальної рідини становила 1200 кПа., частота повторення імпульсів тиску 5 Гц, загальна тривалість встановлення стаціонарного надлишкового тиску та імпульсного режиму подачі тиску складала 10 хв. У кожному випадку підтримували температуру рідинного середовища в робочій камері на рівні 40 °С за допомогою терморегулятора з вбудованим в резервуар (робочу камеру) трубчастим електричним нагрівачем.

Другий етап — імпрегнування бетонних дослідних зразків рідким натрієвим склом. У даному випадку виконували обробку інших бетонних зразків за аналогією з першим етапом, тобто знову двома способами. Операції проведення експерименту та режими роботи устаткування були такими ж як і на першому етапі.

В результаті проведення експериментальних досліджень отримали по три партії зразків з кожного етапу: зразки імпрегновані імпульсним способом, зразки імпрегновані способом ВТВ, контрольні необроблені зразки.

Випробування зразків проводили за стандартними методиками у відповідності вимогам нормативних вимог України.

Дослідні зразки, отримані на першому етапі експерименту разом із контрольними необробленими зразками піддавали випробуванням для отримання показників водопоглинання. Дані випробування здійснювали стандартним способом у відповідності ДСТУ Б В.2.7-42-97 [133].

Глибину проникнення просочувальної композиції у зразків, які були імпрегновані гідрофобізуючим складом, визначали за ступенем набутих гідрофобних властивостей у поперечному зрізі зразків. Гідрофобність матеріалу визначається величиною значення крайового кута змочування водою, тобто чим більша величина кута, тим вища гідрофобність покриття. У відповідності з дослідженнями [134, 135] встановлено, що при величині крайового кута змочування водою менше 90°, поверхню матеріалу прийнято вважати змочуваною або гідрофільною, проте у випадку, коли крайовий кут є більшим

від 90° , то поверхня матеріалу визначається як незмочувана або гідрофобна. Схематичне зображення взаємодії поверхні тіла з водою представлено на рис. 2.7.

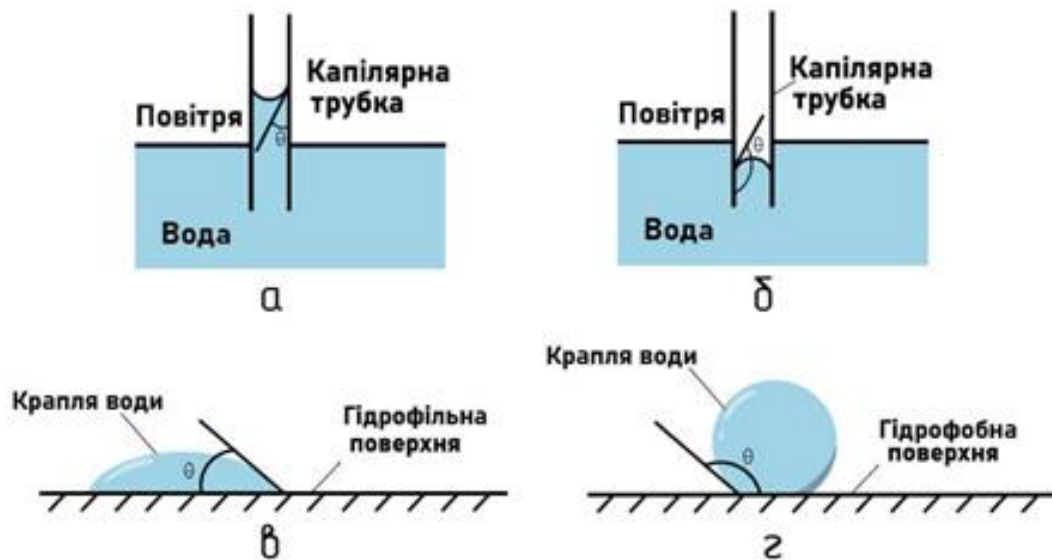


Рисунок 2.7 – Взаємодія води з поверхнею матеріалу:

а), в) — гідрофільний матеріал; б), г) — гідрофобний матеріал.

З огляду на це, глибину проникнення гідрофобізатора у зразки визначали наступним чином. Дослідні зразки-балочки розбивали для того, щоб отримати зріз внутрішньої поверхні. Після чого розбризкували поверхню зрізу водою. У такому випадку імпрегнована частина бетону не змочувалася, а відштовхувала воду, яка формувалася у сферичні краплини. У той же час частина бетону, що залишилася непросоченою, була темнішого забарвлення через значне змочування та водопоглинання. Для вимірювання глибини проникнення силіконового гідрофобізатора використовували штангенциркуль цифровий Sigma з точністю вимірювання $\pm 0,02$ мм. За глибину проникнення було прийнято середній показник шести вимірювань.

Дослідні бетонні зразки, отримані на другому етапі проведення експерименту шляхом імпрегнування рідким натрієвим склом, а також контрольні необроблені зразки випробовували на міцність. Визначення

показників міцності на згин та на стиск дослідних зразків проводили стандартними методами на стандартному обладнанні у відповідності до ДСТУ Б В.2.7-224:2009 [136] в лабораторії будівельних матеріалів та виробів Вінницького національного технічного університету.

Випробування дослідних зразків щодо міцності на згин проводили з використанням випробувальної машини пресу МП-100 (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Випробувальна установка МП-100

В ході випробування міцності на згин зразки-балочки розміром $4 \times 4 \times 16$ см встановлювали на дві циліндричні опори випробувальної машини, що розташовані на відстані $l = 0,1$ м одна від одної. Зразки встановлювали таким чином, щоб його горизонтальні при виготовленні грані були займали вертикальне положення, а навантажувальний елемент циліндричної форми був

розташований посередині зразків при збереженні паралельності всіх елементів завантаження та опор. Межу міцності на згин визначали середнім арифметичним шести випробувань.

Випробування зразків щодо міцності на стиск здійснювали на гідравлічному пресі ПСУ-10 (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – Випробувальна установка ПСУ-10

Для проведення випробувань на стиск використовували половинки зразків-балочок, які були отримані після випробування на згин. Для передачі навантаження на половинки використовують дві сталеві пластини. Частина зразків-балочок розміщували між двома пластинами таким чином, щоб їхні бокові при виготовленні вертикальні грані були розташовані на площинах

пластинок, при щільно прилягаючих опорах пластин до торцевої поверхні дослідних зразків (рис. 2.10).



Рисунок 2.10 – Випробування міцності на стиск

Показники міцності дослідних бетонних зразків визначали через вимірювання навантаження, яке призводить до їх руйнування при поступовому збільшенні сили. Після цього обчислювали граничні напруження при руйнівних зусиллях відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [137]. В ході випробування міцності на стиск дослідні зразки встановлювали таким чином, щоб вектор сили від навантаження преса був строго перпендикулярним до основи дослідного зразка. В даному випадку навантаження, що викликало руйнування зразка, характеризує межа міцності на стиск, що визначається таким рівнянням:

$$R_{cm} = \frac{P_{\max}}{F}, \quad (2.1)$$

де R_{cm} — межа міцності на стиск, кгс;

P_{\max} — руйнівне навантаження, кгс;

F — площа перерізу дослідного зразка, см^2 .

Для визначення приросту маси бетонних зразків після імпрегнування рідким натрієвим склом використовували наступну методику. Зразки, отримані на другому етапі проведення експерименту шляхом імпрегнування двома різними способами, зважували перед обробкою та після неї. Для зважування застосовували електронні ваги ArtLife FL2510 з точністю вимірювання ± 1 г. Бетонні зразки перед імпрегнуванням очищували від пилу та бруду, після чого залишали висохнути за температури 20 ± 3 °С. Кожен зразок зважували на електронних вагах, фіксуючи початкову масу m_0 з точністю до 1 г. Після завершення імпрегнування зразки залишали до повного висихання. Потім їх повторно зважували для визначення кінцевої маси m_1 . Приріст маси кожного зразка визначали як різницю між кінцевою та початковою масами

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100\%, \quad (2.3)$$

де m_0 — маса зразка до імпрегнування, г;

m_1 — маса зразка до імпрегнування, г.

Отримані результати аналізували для визначення середнього приросту маси імпрегнованих зразків, що дозволяло оцінити ефективність обробки рідким натрієвим склом.

2.6 Планування багатofакторного експерименту

До початку проведення експериментальних досліджень було виконано планування експерименту. За параметр оптимізації була обрана глибина просочення зразків. Для дослідження процесів проникнення просочувального складу в глибину зразків були обрані для варіювання такі фактори:

p – повний тиск просочувальної композиції, кПа;

ω – частота повторення імпульсів тиску, Гц;

μ – динамічна в'язкість прсочувальної композиції, мПа·с.

Отже, глибина просочення будівельних матеріалів капілярно-пористої будови є функцією від 3 параметрів

$$h = f(p, \omega, \mu). \quad (2.3)$$

Дослідження впливу наведених вище факторів на глибину імпрегнування будівельних матеріалів при проведенні однофакторних експериментів пов'язане з великою трудомісткістю, тому є доцільним проведення багатофакторного експерименту для отримання рівнянь регресії для функцій відгуку h з використанням повнофакторного експерименту виду 2^3 методом Бокса – Уілсона.

Для коректного визначення діапазонів варіювання факторів функції (2.3) виконували пошукові експерименти з вимогою, яка полягала в тому, щоб сукупність факторів у передбачених планом експерименту діапазонах були чітко реалізовані та не приводили протиріч. Кожний фактор наділений такими значеннями: X_{j0} – основний рівень фактора; X_{jmax} , X_{jmin} – верхній та нижній рівні фактора; αX_{jmax} , αX_{jmin} – зіркові верхній та нижній рівні фактора; α – зіркові плечі; I_j – інтервал варіювання.

З метою отримання поверхні відгуку цих функцій було проведено кодування факторів, яке представлено лінійним перетворенням факторного простору

$$x_j = \frac{(\tilde{X}_j - \tilde{X}_{j0})}{I_j} \quad (2.4)$$

Встановлено такі значення рівнів факторів в умовному масштабі: мінімальний -1 , середній 0 , максимальний $+1$ та зіркові значення $-1,682$, $+1,682$. Основні рівні, інтервали варіювання та межі області експериментальних досліджень наведені в таблиці 2.8.

Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактори	Рівні факторів					Інтервал варіювання
	-1,682	-1	0	+1	+1,682	
x_1 – повний тиск просочувальної композиції, кПа	300	500	700	900	1200	200
x_2 – частота повторення імпульсів тиску, Гц	1	3	5	7	9	2
x_3 – динамічна в'язкість прсочувальної композиції, мПа·с	10	15	20	25	30	5

Для визначення точкових оцінок $b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{13}, b_{11}, \dots, b_{33}$ використовувався метод найменших квадратів [138]:

$$B = Y\Phi^{-1}, \quad (2.5)$$

де $B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_k \end{bmatrix}$ – матриця, що містить коефіцієнти регресії;

$\Phi = F^T F$ – інформаційна матриця Фішера;

$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_N \end{bmatrix}$ – матриця, що містить результати експериментів за матрицею

планування;

$F = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & \dots & x_{1,k} \\ 1 & x_{2,1} & \dots & x_{2,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{N,1} & \dots & x_{N,k} \end{bmatrix}$ – матриця, що містить значення факторів $x_{i,j}$ (де i –

номер дослідів за матрицею планування; j – номер фактора); k – кількість факторів; N – кількість дослідів.

Перевірка адекватності регресійних моделей за критерієм Фішера [138]:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{vidm}^2} \leq [F(f_1, f_2)], \quad (2.6)$$

де $S_{ад}$ – дисперсія адекватності;

$S_{відт}$ – дисперсія відтворюваності;

$[F(f_1, f_2)]$ – критичне значення критерію Фішера, яке рівне значенню розподілу Фішера;

$f_1 = N - d$ – кількість ступенів вільності дисперсії адекватності;

$f_2 = n - 1$ – кількість ступенів вільності дисперсії відтворюваності;

d – кількість значимих коефіцієнтів регресії;

n – число попередніх повторних дослідів, які проведено для середнього (нульового) рівня факторів.

Розрахункове значення критерію F порівнювалося з критичним і при $F > [F(f_1, f_2)]$ регресійна модель вважалася неадекватною.

Дисперсія відтворюваності визначалася за відомою формулою

$$S_{відт}^2 = \frac{1}{f_2} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (2.7)$$

де y_i – результат i -го повторного дослідів;

\bar{y} – середнє арифметичне значення результатів n повторних дослідів.

Кількість дослідів для дрібнофакторного експерименту при квадратичній регресії визначалась за формулою [138]

$$N = 2^{k-1} + 2k + N_0, \quad (2.8)$$

де k – кількість факторів;

2 – кількість рівнів;

N_0 – кількість дослідів в центрі плану, $N_0 = f(k) = f(3) = 10$ згідно з [138].

Отже, $N = 2^{3-1} + 2 \cdot 3 + 10 = 20$ дослідів.

З метою забезпечення достатнього рівня достовірності отриманих результатів для кожної комбінації факторів потрібно виконати кількість випробувань не меншу за n [138]:

$$n = \frac{V^2 t^2}{P^2}, \quad (2.9)$$

де t – показник достовірності;

V – коефіцієнт мінливості досліджуваної величини;

P – показник точності.

Для проведення повнофакторного експерименту виду 2^3 було складено матрицю планування експериментів, яка наведена в табл. 2.9.

Таблиця 2.9

Матриця планування експерименту для цільової функції – глибини імпрегнування h

№ досліджу	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	Y
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	4
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	5
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	2
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	10
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	8
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	8
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	5
9	1	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	1
10	1	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	0	5
11	1	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	5
12	1	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	0	8
13	1	0	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,83	10
14	1	0	0	1,682	0	0	0	0	0	2,83	7
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
b_i	4,824	1,128	1,008	-1,320	-0,12	0,12	-0,12	-0,30	1,803	1,310	
b_{ei}	8,0	0,26	0,12	-18,0	0,001	0,166	-0,12	-0,0012	0,0001	-2,0	
t	15,711	6,371	5,0478	-6,485	-0,46	0,469	-0,46	-3,20	3,040	6,606	$[t]=2,571$

Згідно з рекомендаціями [139] довірна ймовірність P_p при нормуванні величини результуючої та випадкової похибок вимірювальної техніки знаходиться в діапазоні 0,8 ... 0,9. Для обчислення довірчої ймовірності правильності отриманих результатів $P_p = 0,9$, показник достовірності прийнятий $t = 1,96$.

Показник точності прийнятий не більше 5 % ($P = 0,05$). У такому випадку коефіцієнт мінливості при вимірюванні тиску просочувальної композиції в заданих межах не перевищує 6 % ($V = 0,06$).

Тоді кількість дослідів при однакових умовах їх проведення:

$$n = \frac{0,06^2 \cdot 1,96^2}{0,05^2} = 5,53.$$

Приймаємо $n = 6$. Отже, для кожних нових умов при зміні будь-якого параметра системи необхідно було провести не менше шести дослідів.

Визначення дисперсії адекватності [139]

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{f_1} \sum_{i=1}^N (y_i - \tilde{y}_i)^2, \quad (2.10)$$

де y_i – результат i -го дослідів, проведеною за матрицею планування;

\tilde{y}_i – результат i -го значення дослідів, передбаченого за допомогою регресійної моделі.

Значимість коефіцієнтів регресії проводилася за t -критерієм Стьюдента [139]:

$$t_i = \frac{b_i}{S_{\text{адм}} \sqrt{c_{i,i}}} > [t(f_2)], \quad (2.11)$$

де $[t(f_2)]$ – критичне значення t -критерію Стьюдента, що рівне значенню розподілу Стьюдента;

$c_{i,i}$ – відповідний елемент матриці Φ^{-1} .

Виконувалося порівняння розрахункового значення критерію t_i з критичним. У випадку, якщо $t \leq [t(f_2)]$, тоді i -й коефіцієнт регресії вважався незначним.

Відповідно до проведеного багатофакторного експерименту для функції відгуку h рівняння регресії для кодованих значень матиме такий вигляд:

$$h = 4,826 + 1,127x_1 + 1,0081x_2 - 1,32x_3 - 0,125x_1x_2 + 0,125x_1x_3 - 0,125x_2x_3 - 0,3x_1^2 + 1,803x_2^2 + 1,31x_3^2. \quad (2.12)$$

Причому $S_{\text{відм}}^2 = 0,57$; $S_{\text{ад}}^2 = 0,68$; $F = 1,2 < [F] = 1,7$, отже регресійна модель (2.12) є адекватною [139]. Значення коефіцієнта кореляції $R^2 = 0,95$.

Для дійсних значень факторів рівняння регресії для функції відгуку h має вигляд:

$$h = 8 + 0,26p + 0,12\omega - 18k - 0,0012p^2 + 0,0001\omega^2 - 2\mu^2. \quad (2.13)$$

Отримане рівняння регресії дозволяє провести параметричну оптимізацію глибини проникнення (рис. 2.11-2.13).

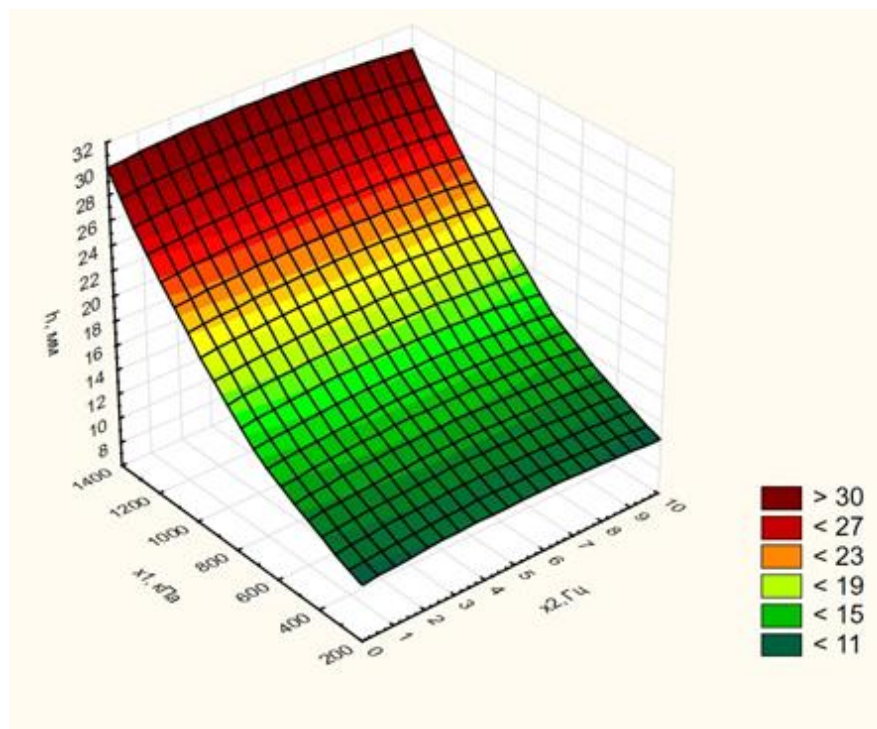


Рисунок 2.11 – Поверхня відгуку залежності глибини проникнення від повного тиску та частоти повторення імпульсів

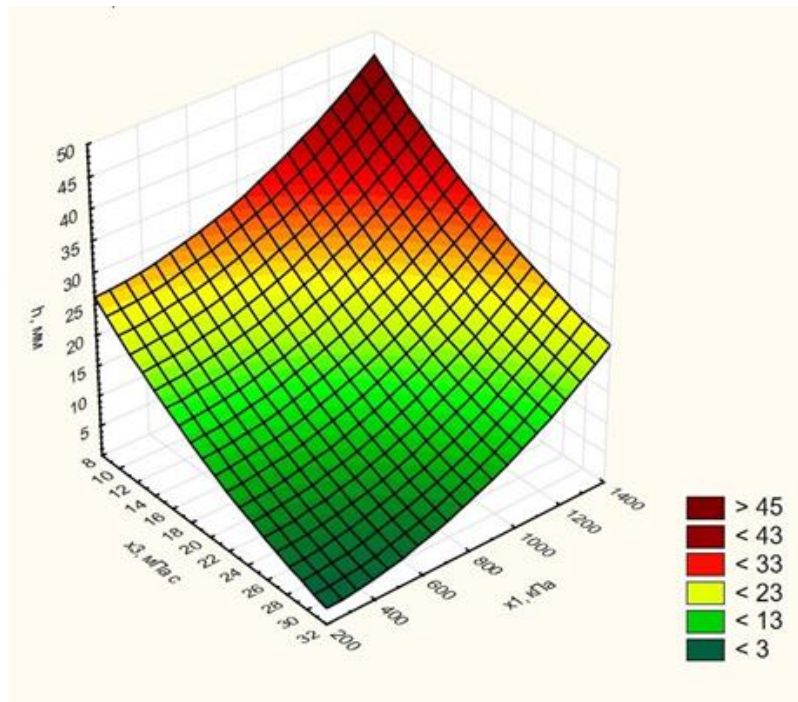


Рисунок 2.12 – Поверхня відгуку залежності глибини проникнення від повного тиску та динамічної в'язкості просочувальної композиції

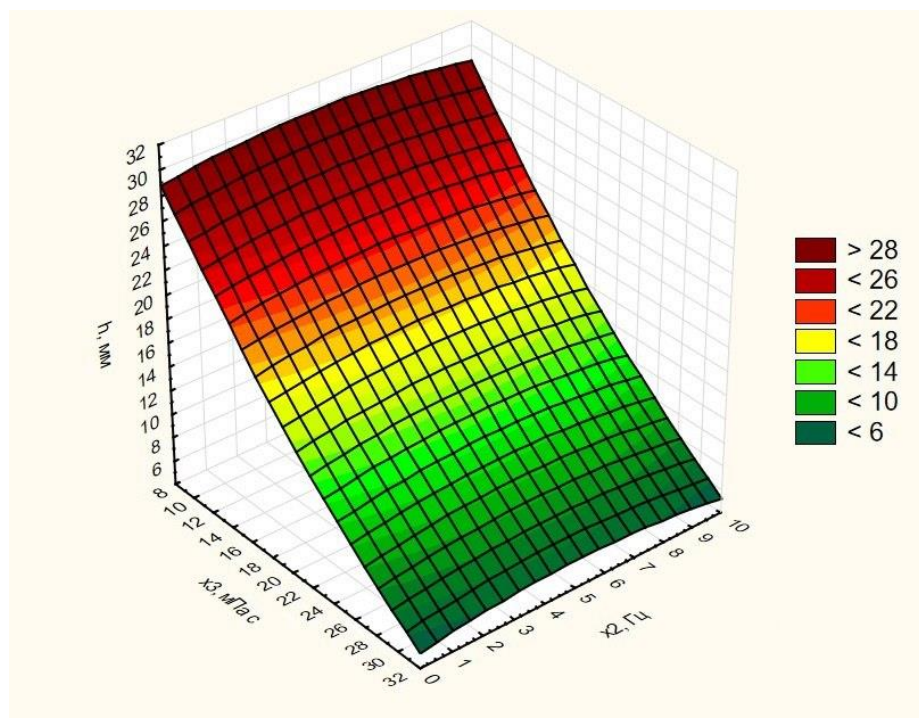


Рисунок 2.13 – Поверхня відгуку залежності глибини проникнення від частоти повторення імпульсів та динамічної в'язкості просочувальної композиції

Отже, як бачимо з поверхонь відгуку, оптимальними для проведення досліджень є дотримання таких параметрів: частота імпульсу 3 ... 7 Гц, в'язкість просочувальної композиції менше 20 мПа·с та величина повного тиску 1200 кПа.

2.7 Висновки до розділу 2

У ході проведення експериментальних досліджень було виготовлено дослідні зразки з бетону у формі балочок розміром 4×4×16 см з В/Ц = 0,5, Ц/З = 1:5,5. Було визначено склад та характеристики компонентів для виготовлення дослідних зразків. Крім того, виконано підбір просочувальних композицій з врахуванням прогнозування їхнього впливу на фізико-механічні властивості оброблених дослідних зразків. Було застосовувано різні типи просочувальних композицій: гідрофобізатор (водний розчин метилсиліконату калію 46%) для зменшення водопоглинання бетону, а також рідке скло натрієве для покращення міцності бетону.

Розроблено конструкцію та змонтовано лабораторний стенд для реалізації відомого способу ВТВ і запропонованого способу імпульсного імпрегнування. Лабораторна установка оснащена необхідним обладнанням для вимірювання контрольних показників під час обробки дослідних матеріалів.

Розроблено методику проведення експериментальних досліджень з врахуванням необхідності порівняння декількох методів імпрегнування бетону. Здійснено опис методів та обладнання для випробувань дослідних зразків у відповідності із стандартними методиками.

Методом планування багатофакторного експерименту отримано квадратичні рівняння регресії, що дозволяють описати залежності значень глибини проникнення просочувального складу h від конструктивно-технологічних параметрів запропонованого устаткування для імпульсного імпрегнування (повного тиску просочувального складу p , частоти повторення імпульсів тиску ω), а також від динамічної в'язкості μ , яка залежить від

хімічного складу та температури просочувальної композиції. Побудовано поверхні відгуку за якими встановлено оптимальні параметри для проведення досліджень, а саме: частоти імпульсів тиску 3...7 Гц, в'язкості просочувальної рідини близько 20 мПа·с, значення повного тиску 1200 кПа. Визначено, що при однакових умовах проведення, необхідно виконати 6 дослідів.

Виконано збір та математичну обробку статистичних даних, отриманих у результаті випробувань зразків на водопоглинання, міцності на стиск та міцності на згин. Визначено глибину проникнення просочувальної композиції внаслідок обробки дослідних зразків гідрофобізатором. Зафіксовані фактичні фізико-механічні характеристики дослідних зразків разом із параметрами обладнання можуть бути використані для подальшого визначення впливу різних просочувальних композицій на фізико-механічні властивості будівельних виробів із бетону модифікованого способом імпульсного імпрегнування, а також розробки технології та обладнання для модифікації будівельних виробів із бетону шляхом імпульсного імпрегнування.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОНИКНЕННЯ РІДИН В КАПЛЯРНО-ПОРИСТІ ТІЛА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ УСТАТКУВАННЯ В ПРОЦЕСІ ПРОСОЧУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Мета та задачі теоретичного дослідження проникнення рідин в товщу будівельних матеріалів в процесі імпрегнування. Основні припущення

Необхідність виконання детального теоретичного аналізу та дослідження загальних закономірностей проникнення рідин у товщу будівельних матеріалів під час імпрегнування необхідне для точного розуміння механізмів взаємодії рідини з матеріалом, що підлягає обробці. Це дозволяє створити умови для оптимізації процесу імпрегнування, покращити рівномірність та глибину проникнення, а також визначити параметри, які впливають на якість і довговічність модифікованих матеріалів.

Визначальними параметрами, які характеризують процес імпрегнування будівельних матеріалів є тривалість просочування, яку встановлює швидкість імпрегнування, глибина заповнення пористих структур або зміна об'єму просочувальної композиції в порах зразків будівельних матеріалів в залежності від їх геометричної будови, режиму імпрегнації, а також властивостей просочувальної композиції. З огляду на це, модель проникнення просочувального складу у КПС будівельного матеріалу можна охарактеризувати такими групами параметрів:

1. Початкові дані. Властивості будівельного матеріалу, що підлягають просочуванню, а також властивості просочувального складу. До перших належать: пористість матеріалу, кількість відкритих, замкнених пор, сполучних пор, залишкова вологість, наявність розчинених компонентів та їх тип у залишковому об'ємі води, коефіцієнт фільтрації або ступінь проникності

матеріалу. До других відносяться: густина, в'язкість, хімічний склад, тривалість кристалізації.

2. Технологічні та конструктивні параметри устаткування для імпрегнування будівельних матеріалів. Сюди відносяться тип і конструкція апарату для просочування, повний тиск, створюваний устаткуванням, частота та амплітуда повторення імпульсів тиску рідини, тривалість імпрегнування, витрата просочувальної композиції.

3. Розрахункові показники, а саме: максимальна глибина проникнення просочувальної композиції, швидкість руху просочувального складу, рівномірність просочування об'єму КПТ, приріст маси обробленого матеріалу.

4. Фізико-механічні та інші показники імпрегнування будівельних матеріалів: границя міцності на стиск та згин, гідрофобні властивості (водопоглинання), показники хімічної стійкості, щільність матеріалу.

Знання про закономірності руху рідини в будівельних матеріалах капілярно-пористої будови відкриють можливість прогнозування результатів обробки матеріалів залежно від обраних технологічних параметрів імпрегнування.

3.2 Особливості розповсюдження технологічних розчинів в капілярно-пористій структурі будівельних матеріалів у процесі імпульсного імпрегнування

На процесі імпрегнування будівельних матеріалів, зокрема бетонів, як капілярно-пористих тіл, впливає сукупність перебігу таких фізичних явищ [140-142]:

- Рух просочувальної композиції у бетоні під дією капілярного тиску.
- Рух просочувального складу в структурі бетону під впливом різниці тисків у попередньо вакуумованому капілярному (пористому) просторі внаслідок дії прикладеного надлишкового тиску. Даний надлишковий тиск є сумою двох складових рідинного тиску, а саме: статичної складової тиску і

динамічної або імпульсної складової тиску. Переміщення рідини у КПС під час імпрегнування із застосуванням надлишкового тиску, наприклад, способом ВТВ, включає лише статичну складову, так як пульсуючий режим тиску рідини відсутній. Водночас рух просочувального складу в КПС матеріалів в ході імпрегнування запропонованою технологією [143-145], що передбачає застосування імпульсів тиску, виникає внаслідок поєднання статичної складової з імпульсною (пульсуючою, ударною) складовою тиску.

- Дифузійне переміщення молекул та іонів просочувального складу у товщі КПТ.

Просочувальна рідина заповнює КПС зразка, зануреного в неї, під дією капілярних сил всмоктування, а також внаслідок дії тиску, встановленого рідинним середовищем, таким чином:

$$\Delta p = p_p + p_k - p_{втр}, \quad (3.1)$$

де Δp – різниця тисків, що зумовлює переміщення рідини;

p_p – тиск рідинного середовища;

p_k – капілярний тиск;

$p_{втр}$ – втрати тиску в КПС матеріалу.

Відомо, що капілярний тиск виникає під впливом сил поверхневого натягу [146]

$$p_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{r}, \quad (3.2)$$

де σ – сила поверхневого натягу;

θ – крайовий кут змочування;

r – радіус капіляра.

Рівняння (3.2) демонструє важливість вибору типу просочувальної композиції за критерієм в'язкості, оскільки рідини з низькою в'язкістю характеризуються меншим кутом змочування, а це призводить до зростання капілярного тиску.

Механізм дифузійного імпрегнування КПТ пояснюється проникненням молекул чи іонів солі з просочувального складу, що дифундують у рідину, яку містить зразок, що піддається імпрегнуванню [147]. Явище дифузії виникає внаслідок різниці концентрацій складових просочувального розчину та складових, розчинених у рідині, яка міститься в КПС зразка. Процес дифузійного імпрегнування описується першим законом Фіка:

$$j = -D \frac{dC}{dx}, \quad (3.3)$$

де j – дифузійний потік;

D – коефіцієнт дифузії;

$\frac{dC}{dx}$ – градієнт концентрації.

Запропонований спосіб імпрегнування, згаданий у розділі 2, передбачає циклічну зміну величини надлишкового тиску, тобто ударні пульсації тиску рідини із заданою періодичністю (частотою пульсацій або частотою імпульсів). За таких умов більш доцільним буде використання терміну «ударного» або «імпульсного» тиску на зміну «надлишковому».

В роботах [146, 149] для опису проникнення рідини в КПП використовують рівняння, що застосовують для опису фільтраційних явищ.

У такому разі рух нестисливої рідини в капілярно-пористій структурі може характеризуватися таким рівнянням [146]:

$$v = \frac{k}{\mu} \cdot S \cdot \frac{p_1 - p_2}{l}, \quad (3.4)$$

де v – швидкість переміщення просочувальної рідини у КПП;

k – коефіцієнт фільтрації;

μ – динамічна в'язкість рідини;

S – площа перерізу КПП;

$p_1 - p_2$ – градієнт тиску на кінцях КПП;

l – довжина зразка.

Як видно з рівняння (3.4), зниження в'язкості просочувальної композиції сприятиме збільшенню швидкості її проникнення вглиб КПТ, зважаючи на те, що низьков'язкі рідини вирізняються кращою проникністю, а також є затребуваними в процесах імпрегнування. З огляду на це, можна стверджувати, що збільшення температури позитивно впливає на ефекти імпрегнування через зниження в'язкості просочувальних складів, тому для підвищення ефективності імпрегнування використовують нагрівання просочувальних композицій. Нагрівання рідини призводить до зниження її в'язкості, що дозволяє краще та глибше проникати в пористі структури матеріалу. Це особливо важливо для щільних або мало пористих матеріалів, де необхідна максимальна глибина просочування. Крім того, підвищення температури здебільшого зменшує поверхневий натяг просочувальних складів, що сприяє його розтіканню по поверхні матеріалу і кращому проникненню в його структуру.

Деякі просочувальні склади активніше вступають у реакції з каталізаторами при підвищених температурах, що може підсилювати їхню ефективність. Наприклад, для затвердіння полімеру в ході термокatalітичної полімеризації. Однак в ряді випадків застосування високих температур може негативно вплинути на характеристики просочувального матеріалу або спричинити випаровування просочувальної композиції з поверхні модифікованого матеріалу після завершення імпрегнування [149].

При моделюванні процесу проникнення рідини внаслідок імпрегнування із застосуванням імпульсів тиску виникає потреба враховувати зміну складових в'язкості просочувального складу [148]. В такому випадку може застосовуватись поняття вібраційної в'язкості — ефективної в'язкості рідини під дією коливань або імпульсів тиску, яка впливає на проникність рідини у КПС матеріалу. Це важлива характеристика, оскільки вона може змінюватися залежно від режиму нагнітання рідини в об'єм тіла, що підлягає імпрегнуванню. Імпульсний режим передбачає періодичну зміну тиску, що може тимчасово знижувати в'язкість просочувальної рідини. Явище зниження в'язкості, у свою чергу, полегшує проникнення в пористу структуру, особливо у випадках вузьких пор і

мікротріщин, і дозволяє просочувальному складу краще проникати навіть у важкопросочувані матеріали. Частота імпульсів впливає на динаміку руху просочувального складу. Потребують подальшого детального дослідження процеси, що виникають у КПС матеріалів залежно від зміни частоти повторювання імпульсів тиску. Застосування більших значень частоти може призводити до зниження вібраційної в'язкості завдяки ефекту вібраційного розрідження. Це сприяє збільшенню проникності просочувального складу і дозволяє ефективніше долати гідравлічний опір КПТ. Амплітуда тиску також має вплив на проникність просочувального складу. При вищій амплітуді в'язкість рідини в системі може значно знижуватись, що сприяє глибшому проникненню просочувальної рідини у КПТ.

Інше фільтраційне рівняння, яким описують рух в КПТ має такий вигляд [146]:

$$v = k \cdot J^{1/n}, \quad (3.5)$$

де v – швидкість фільтрації;

k – коефіцієнт фільтрації;

n – фільтраційна характеристика;

J – п'єзометричний напір.

Визначення коефіцієнта фільтрації для різних матеріалів, що піддаються імпрегнуванню, є досить складною процедурою. З огляду на це, фільтраційні рівняння частіше застосовують для опису явищ імпрегнування, а не для практичних числових розрахунків у даному напрямку.

У розділі 1 проаналізовано, зокрема, особливості мікроструктури бетону, яка передбачає наявність пор, капілярів та інших пустот. Крім того, відзначається неоднорідність геометричних характеристик бетону. Зображення бетону, зроблене скануючим електронним мікроскопом представлено на рис 3.1.

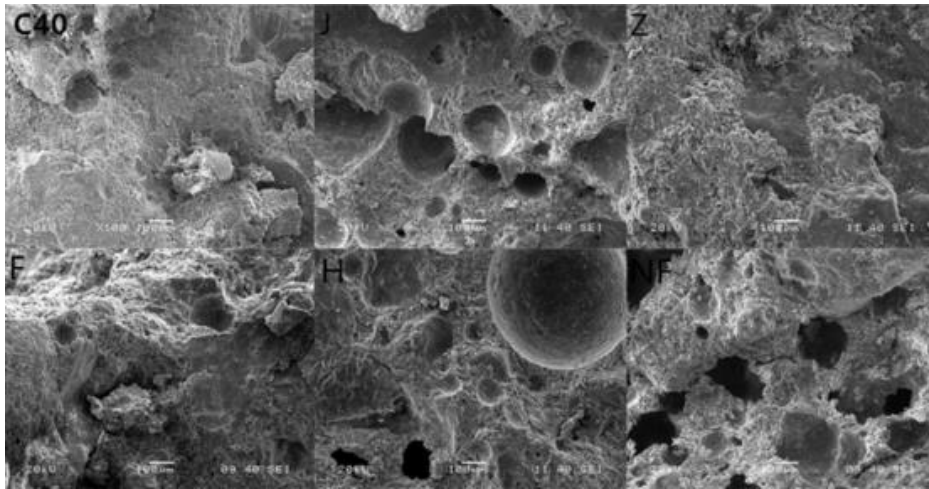


Рисунок 3.1 – Структура бетону збільшена у 100 разів [150].

Крім того, що пори мають широкий діапазон розмірів, їхня геометрична форма також варіюється. На ці характеристики впливає низка факторів, розглянуті у розділі 1, з-поміж яких є склад бетонної суміші, показник В/Ц, тривалість процесу формування зразка. При цьому капілярна система матеріалу включає можливість сполучення пор бетонного зразка через численні капілярні канали (рис. 3.2).

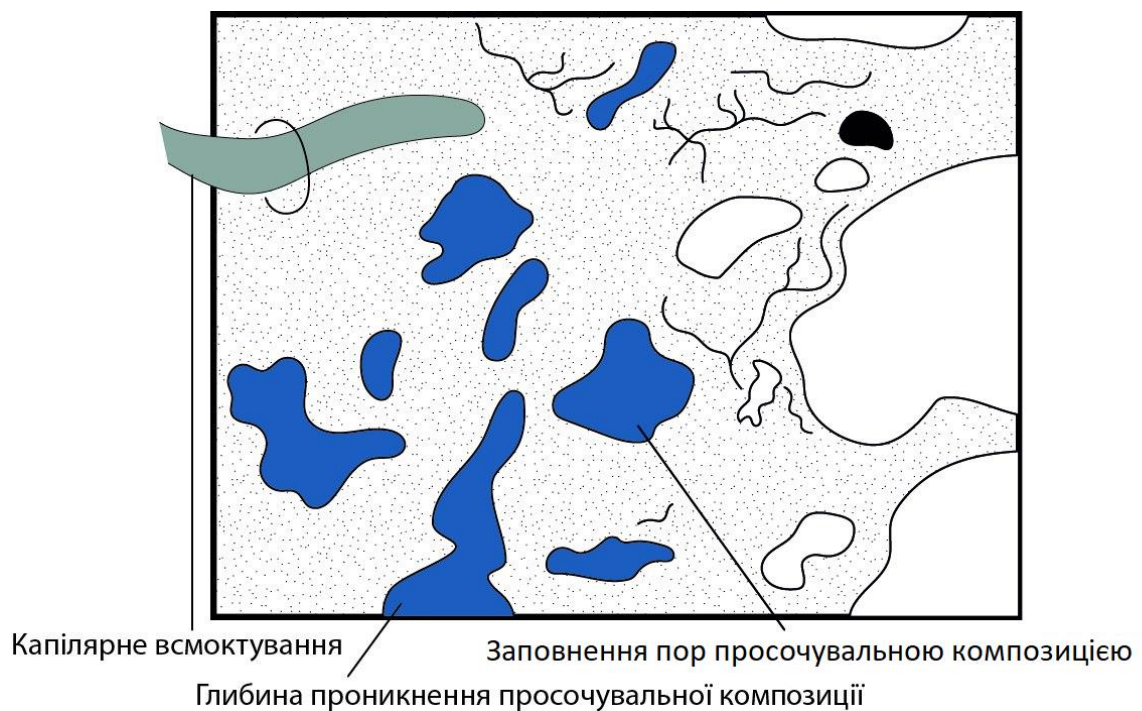


Рисунок 3.2 – Проникнення просочувальної композиції в структуру бетону

Проникнення рідин в капілярно-пористі матеріали залежить від розмірів, розподілу, структури капілярів та пор, початкової змочуваності матеріалу, кількості повітря, затиснутого порох, властивостей просочувального складу, таких як в'язкість, густина, поверхневий натяг, хімічна інертність тощо [140]. Для моделювання проникнення просочувальної рідини в КПС за геометричну модель пори бетонного зразка було обрано сферичну фігуру, в той час як циліндрична фігура відповідає моделі капіляра (рис. 3.3).

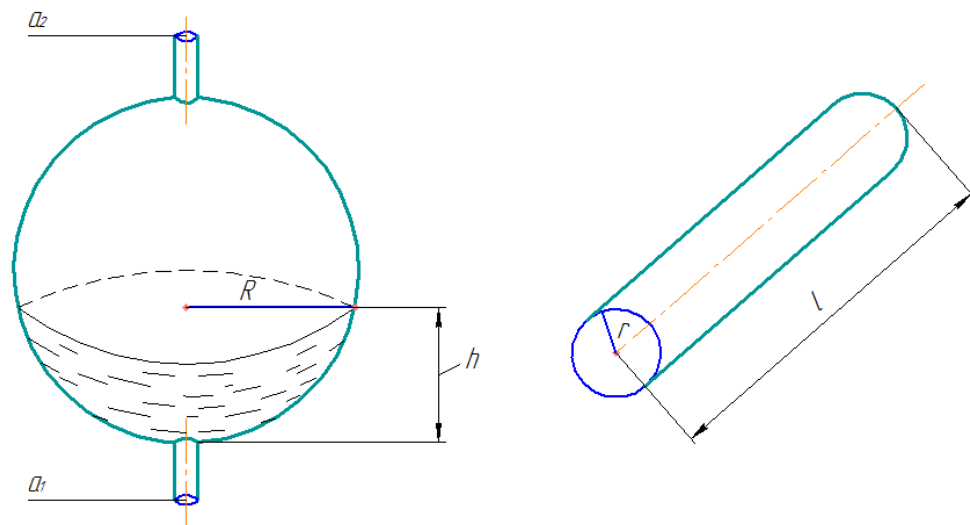


Рисунок 3.3 – Схематичне зображення геометричних моделей пори та капіляра

Ступінь впливу просочувальних композицій на зміну властивостей будівельних матеріалів та виробів, а відповідно і ефективність імпрегнування часто визначається глибиною проникнення та розподілом рідини в об'ємі матеріалу. У випадку, якщо модель пори бетонного тіла матиме площу перерізу $S = S(h)$, тоді h — рівень проникнення рідини у сферичну пору або іншими словами глибина проникнення просочувального складу. З огляду на капілярну систему, яка сполучає, передбачаємо наявність входного та вихідного отвору в порі, що служить для входу і виходу просочувальної рідини, а також уособлюють в собі всі можливі капілярні під'єднання до пори. Причому площі даних отворів a_1 і a_2 відповідно.

Заповнення пори просочувальною рідиною передбачає зміну об'єму даної рідини протягом деякого інтервалу часу Δt . Для опису даного процесу використаємо залежність

$$\Delta V = (a_1 v_1 - a_2 v_2) \cdot \Delta t, \quad (3.6)$$

де ΔV – зміна об'єму рідини в порі;

a_1, a_2 – площі вхідного та вихідного отвору в порі;

v_1 – швидкість переміщення рідини у вхідному каналі;

v_2 – швидкість переміщення рідини у вихідному каналі.

Зміну об'єму рідини в сферичній порі:

$$\Delta V = \pi \Delta h^2 \cdot \left(R - \frac{1}{3} \Delta h \right), \quad (3.7)$$

де Δh – зміна рівня довжини (глибини) проникнення рідини в порі;

R – радіус пори.

Враховуючи залежності (3.6) і (3.7), отримаємо рівняння, яка описує зміну рівня рідини в порі з врахуванням швидкостей переміщення рідини на вхідному та вихідному каналі протягом деякого інтервалу часу імпрегнування

$$\pi \Delta h^2 \cdot \left(R - \frac{1}{3} \Delta h \right) = (a_1 v_1 - a_2 v_2) \cdot \Delta t. \quad (3.8)$$

Для визначення швидкостей руху на вході та виході з капіляра слід використовувати формулу

$$v_{1,2} = \sqrt{\frac{2\Delta p_{1,2}}{\rho}}, \quad (3.9)$$

де $\Delta p_{1,2}$ – різниця тисків або повний тиск на вході та виході з капіляра (або у вхідному та вихідному капілярах) відповідно;

ρ – густина просочувального складу.

Імпрегнування будівельних матеріалів капілярно-пористої будови із застосуванням імпульсів тиску передбачає створення додаткового динамічного

тиску, який накладається на стаціонарний надлишковий тиск просочувальної композиції. Для здійснення математичного моделювання було використано спрощений графік коливань імпульсів тиску просочувальної композиції за синусоїдальним законом протягом періоду часу (рис. 3.4).

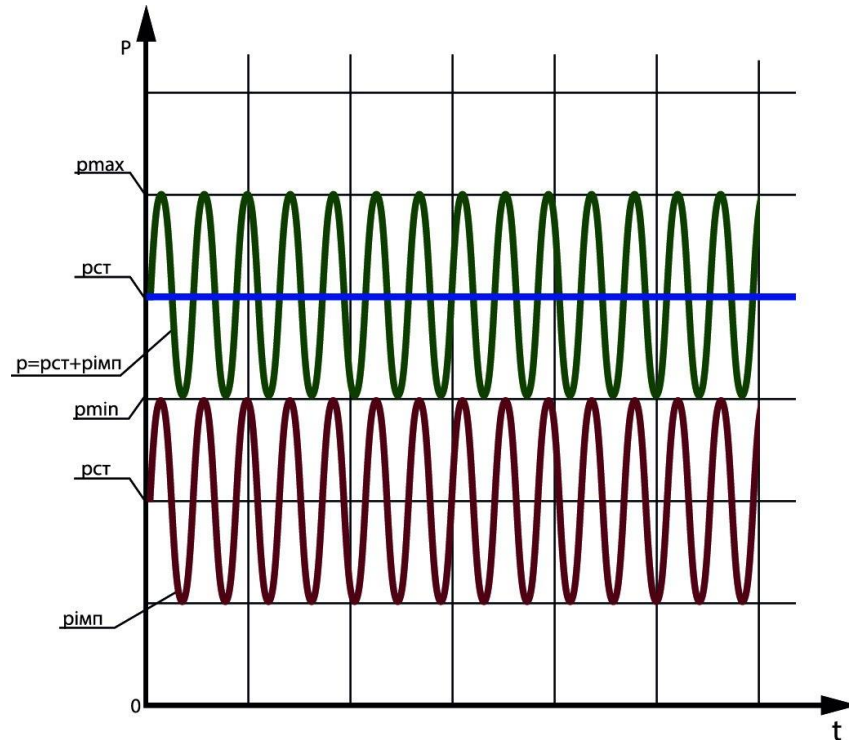


Рисунок 3.4 – Спрощений графік залежності тиску просочувальної композиції від тривалості імпрегнування

У такому випадку повний тиск просочувальної композиції, створений устаткуванням для імпрегнування, буде визначатися рівнянням

$$P_p = P_{iмп} + P_{ст}, \quad (3.10)$$

де $P_{iмп}$ – динамічна складова імпульсів тиску просочувальної композиції;

де $P_{ст}$ – статична складова тиску просочувальної композиції.

Тиск в капілярі за використання гідроімпульсного пристрою для генерування гармонічних коливань [149], для яких величина імпульсного тиску буде змінюватись за синусоїдальним законом протягом інтервалу часу t , описується такою залежністю

$$P_{imn}(t) = P_{max} \cdot \sin(2\pi\omega t + \psi), \quad (3.11)$$

де P_{max} – амплітуда тиску в при застосуванні імпульсів тиску рідини;

ω – частота зміни тиску за період часу;

t – тривалість імпульсів тиску рідини;

ψ – початкова фаза.

З урахуванням залежності (3.1), отримаємо рівняння для визначення різниці тисків, яка зумовлює заповнення пористої структури бетонного зразка

$$\Delta p = P_K + P_{imn} + P_{cm} - P_{втр}, \quad (3.12)$$

$P_{втр}$ – втрати тиску в капілярі.

Відповідно до рівнянь (3.1) та (3.12), для «глухої» пори з одним отвором для підведення капілярного каналу отримаємо:

$$\Delta p = P_K + P_{imn} + P_{cm} - P_{втр} - P_n, \quad (3.13)$$

де P_n – тиск повітря (та залишків вологи), затиснутого всередині пори.

Виходячи із залежностей (3.11), (3.12) та (3.13), отримуємо рівняння, які описують різницю тисків, спричинену застосуванням імпульсного режиму зміни тиску за синусоїдальним законом, що зумовлює рух просочувального складу в порах і капілярах бетонного зразка.

Рівняння для розімкнутої пори або капіляра

$$\Delta p = P_K + P_{max} \cdot \sin(2\pi\omega t + \psi) + P_{cm} - P_{втр}. \quad (3.14)$$

Рівняння для замкненої «глухої» пори

$$\Delta p = P_K + P_{max} \cdot \sin(2\pi\omega t + \psi) + P_{cm} - P_{втр} - P_n. \quad (3.15)$$

Для визначення статичної складової тиску просочувальної рідини буде справедливим рівняння

$$P_{cm} = 0,5(P_{max} + P_{min}) \quad (3.16)$$

Підставляючи (3.16) в (3.14) та (3.15), а також нехтуючи тиском капілярного всмоктування через його малу величину відносно повного надлишкового тиску рідини, отримаємо рівняння різниці тисків

- для розімкненої пори або капіляра

$$\Delta p = p_{\max} (\sin(2\pi\omega t + \psi) + 0,5) + 0,5 p_{\min} - P_{втр}; \quad (3.17)$$

- для замкненої «глухої» пори

$$\Delta p = p_{\max} (\sin(2\pi\omega t + \psi) + 0,5) + 0,5 p_{\min} - P_{втр} - P_n. \quad (3.18)$$

Знаючи радіус капіляра r , можна розрахувати довжину (глибину) проникнення просочувального складу у капіляр, враховуючи (3.2):

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}, \quad (3.19)$$

де h – відстань, яку подолала просочувальна композиція по довжині капіляру.

Втрати тиску в капілярі визначаються параметрами швидкості та характером руху просочувального складу. Для розрахунку втрат тиску, що виникають внаслідок тертя під час переміщення рідини по довжині капіляра l , можна використовувати формулу Дарсі-Вейсбаха

$$P_{втр} = \lambda \frac{h}{2r} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.20)$$

або

$$P_{втр} = \lambda \frac{h \rho v^2}{4r}, \quad (3.21)$$

де ρ – густина просочувального складу;

v – швидкість руху просочувального складу в капілярі або порі;

λ – коефіцієнт гідравлічного тертя, який визначається режимом руху просочувального складу, геометричної будови стінок пор і капілярів, які характеризуються шорсткістю k_e , і визначається формулою Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k_e}{2r} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (3.22)$$

де Re — число Рейнольдса, яке враховує режим руху рідини в капілярі або порі.

Виконана математична модель дає можливість визначити основні технологічні параметри процесу імпрегнування бетонних зразків. Отримані залежності (3.7), (3.8) дозволяють визначити ступінь наповнення просочувальною композицією об'єму пори КПТ в залежності від тривалості імпрегнування. Врахування геометричної будови пори, що представлена моделлю у вигляді сферичної фігури, а також розмірів капілярів КПТ дозволяє встановити їхній зв'язок зі швидкістю руху просочувальної рідини, який відбувається під дією надлишкового статичного та імпульсного тиску.

3.3 Математичне моделювання оцінювання технічного стану устаткування для імпульсного імпрегнування виробів із бетону

Розвиток технологій модифікації будівельних виробів із бетону шляхом їх імпрегнування просочувальними композиціями зумовлює передумови для вдосконалення обладнання для їх реалізації, а відповідно і створення нових конструктивних рішень. Виникає потреба в прогнозуванні ймовірності якісної роботи нових конструкцій устаткування даної галузі. Прогнозування безвідмовної роботи розглядуваного обладнання для імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів може базуватись на математичній моделі оцінки його надійності. Це передбачає встановлення ієрархічних зв'язків між факторами, використання лінгвістичних змінних для оцінки кількісних та якісних ознак, формування експертних баз знань та розробку нечітких логічних рівнянь для побудови функцій належності змінних.

Побудуємо математичну модель, яка базується на методах нечіткої логіки. Вхідні змінні будуть представлені показниками роботи системи, а вихідною змінною приймаємо технічний стан системи.

Експертні оцінки є важливими джерелами інформації, що допомагають встановити аналітичні взаємозалежності між вхідними та вихідними змінними, які суттєво впливають на якість імпрегнування, при розробці експериментальної установки [151]. До таких факторів належать: повний робочий тиск, частота імпульсів тиску, тривалість імпрегнування. Фактори надійності обладнання для імпульсного імпрегнування будівельних виробів наведено на рис. 3.5.



Рисунок 3.5 — Класифікація факторів, що впливають на технічний стан устаткування для імпульсного імпрегнування бетонних виробів

Для отримання результатів моделювання, на основі експертної бази знань і термів функції належності, складено базу нечітких логічних рівнянь. Для створення експериментально-модельної системи багатofакторного аналізу впливу прийнятих факторів на надійність роботи розглянутого устаткування, які характеризуються лінгвістичними та якісними термами, використано теорію нечітких та лінгвістичних змінних [152].

На системному рівні, фактори впливу на надійність обладнання для імпрегнування як лінгвістичну змінну, можна представити у вигляді залежності:

$$y = f_y(x_1, x_2, x_3), \quad (3.19)$$

де x_1 – лінгвістична змінна (ЛЗ), що описує повний робочий тиск;

x_2 – ЛЗ, що описує частоту імпульсів тиску;

x_3 – ЛЗ, що описує тривалість імпрегнування.

Всі фактори впливу, що впливають на технічний стан устаткування для імпульсного імпрегнування бетонних виробів розглядаються як лінгвістичні змінні, що задані на відповідних універсальних множинах і оцінюються нечіткими термами. Якісний нечіткий терм є лінгвістичною змінною, значення якої виражається словом [151, 152]. Використання нечітких термів (табл. 3.1) дозволяє побудувати експертні нечіткі бази знань, які віддзеркалюють зв'язки між вхідними та вихідними змінними.

Таблиця 3.1

**Лінгвістичне оцінка змінних параметрів устаткування для
імпульсного імпрегнування виробів із бетону**

Параметр и	Назва, розмірність	Універсальна множина	Терми для оцінювання
1	2	3	4
x_1	повний робочий тиск, кПа	300...2100	дуже низький (WL), низький (L), номінальний (N), високий (H)
x_2	частота імпульсів тиску, Гц	1...7	дуже низька (WL), низька (L), середня (N), вище середнього (WN), висока (H)
x_3	тривалість імпрегнування, год	0,2...1	коротка (L), середня (N), довга (H)
у	Стан системи	1...5 умовних одиниць	несправна (L), надійна (N), висока надійність (H)

За результатами сукупності параметрів, що характеризують фактори впливу на технічний стан устаткування для імпульсного імпрегнування виробів із бетону, побудовано дерево логічного висновку ієрархічних зв'язків (рис. 3.6).

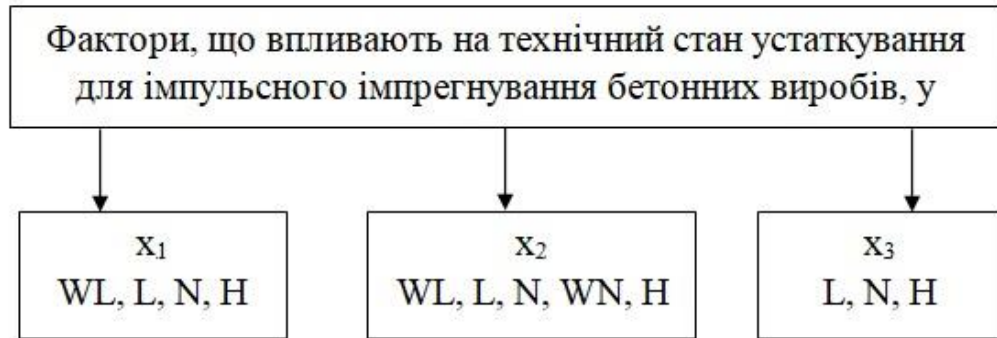


Рисунок 3.6 — Дерево логічного висновку ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на технічний стан обладнання

Корінь дерева логічних висновків, як інтегральний показник дозволяє на експертному рівні здійснювати інтелектуальну підтримку щодо оцінки технічного стану устаткування для імпульсного імпрегнування виробів із бетону.

Виконана формалізація та ієрархічна класифікація параметрів оцінки технічного стану обладнання для імпульсного просочування будівельних виробів дозволяє побудувати функції належності нечітких оцінок впливу параметрів на технічний стан системи.

З метою отримання результатів моделювання сформуємо, на основі експертної бази знань і термів функції належності, базу нечітких логічних рівнянь, при цьому будемо використовувати операції \wedge (І-min) та \vee (АБО-max) [153]. В табл. 3.2 приведено базу знань термів для оцінювання від низького (L) до високого (H) та їх вплив на технічний стан устаткування на системному рівні.

Таблиця 3.2

Експертна база знань термів на системному рівні залежності (Y)

Якщо			то
Вхідні змінні			Вихідна змінна
x_1	x_2	x_3	y
H	H	H	H
H	H	N	
N	H	H	
H	N	H	
H	WN	H	
N	WN	H	
N	L	H	
N	H	L	
H	WN	L	
H	WL	H	
N	N	H	
H	N	N	
N	H	N	
N	WN	N	
H	N	L	
L	N	H	
N	L	H	
H	L	N	
L	WN	N	
N	WN	L	
WL	WN	N	
WL	WN	H	
N	N	N	L
L	L	L	
L	N	L	
N	L	L	
L	L	N	
WL	N	N	
N	WL	N	
L	WN	L	
WL	WL	N	
WL	L	L	
WL	WL	L	
WL	WH	L	

Нечіткі логічні рівняння, які характеризують поверхню належності змінних табл. 3.2 по відповідному терму:

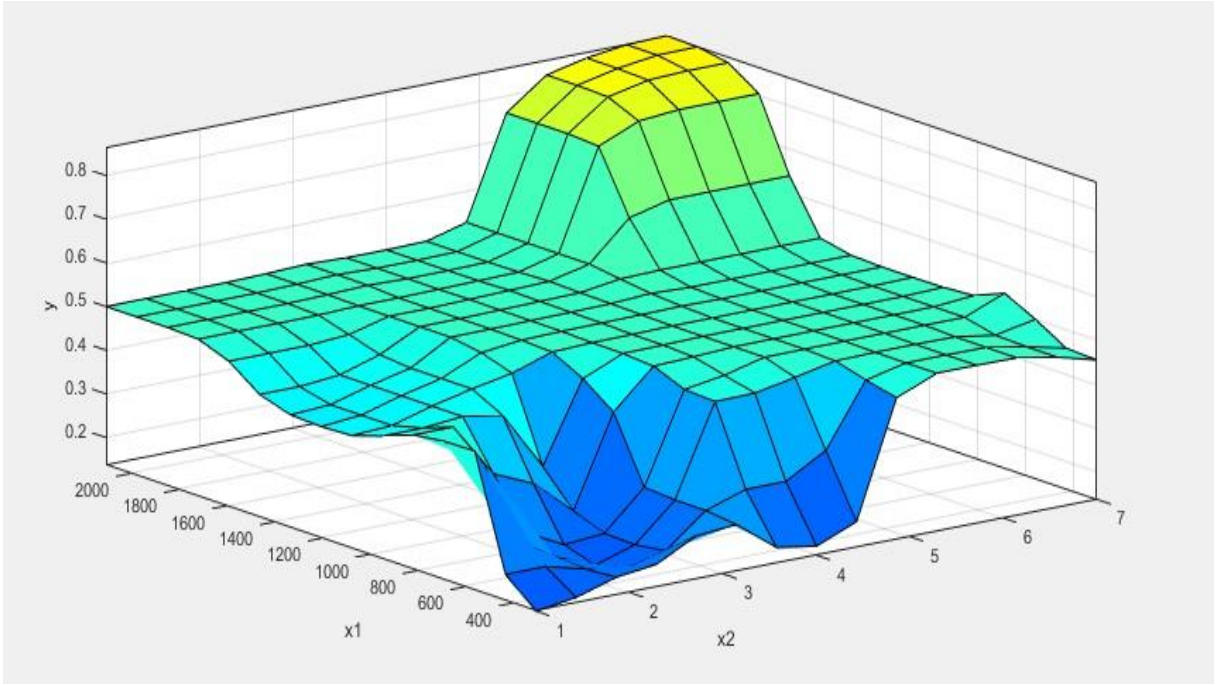
$$\begin{aligned} \mu_L(y) = & \mu_{WL}(x_1) \wedge \mu_{WN}(x_2) \wedge \mu_L(x_3) \vee \mu_{WL}(x_1) \wedge \mu_{WL}(x_2) \wedge \mu_L(x_3) \vee \mu_{WL}(x_1) \wedge \mu_L(x_2) \wedge \\ & \mu_L(x_3) \vee \mu_{WL}(x_1) \wedge \mu_{WL}(x_2) \wedge \mu_N(x_3) \vee \mu_L(x_1) \wedge \mu_{WN}(x_2) \wedge \mu_L(x_3) \vee \mu_{WL}(x_1) \wedge \mu_N(x_2) \wedge \\ & \mu_N(x_3) \vee \mu_L(x_1) \wedge \mu_L(x_2) \wedge \mu_N(x_3) \vee \mu_N(x_1) \wedge \mu_L(x_2) \wedge \mu_L(x_3) \vee \mu_L(x_1) \wedge \mu_N(x_2) \wedge \mu_L(x_3) \vee \\ & \mu_L(x_1) \wedge \mu_L(x_2) \wedge \mu_L(x_3); \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \mu_N(y) = & \mu_N(x_1) \wedge \mu_N(x_2) \wedge \mu_N(x_3) \vee \mu_N(x_1) \wedge \mu_N(x_2) \wedge \mu_H(x_3) \vee \mu_H(x_1) \wedge \mu_N(x_2) \wedge \mu_N(x_3) \vee \\ & \mu_N(x_1) \wedge \mu_H(x_2) \wedge \mu_N(x_3) \vee \mu_N(x_1) \wedge \mu_{WN}(x_2) \wedge \mu_N(x_3) \vee \mu_H(x_1) \wedge \mu_N(x_2) \wedge \mu_L(x_3) \vee \\ & \mu_L(x_1) \wedge \mu_N(x_2) \wedge \mu_H(x_3) \vee \mu_N(x_1) \wedge \mu_L(x_2) \wedge \mu_H(x_3) \vee \mu_H(x_1) \wedge \mu_L(x_2) \wedge \mu_N(x_3) \vee \\ & \mu_L(x_1) \wedge \mu_{WN}(x_2) \wedge \mu_N(x_3) \vee \mu_N(x_1) \wedge \mu_{WN}(x_2) \wedge \mu_L(x_3) \vee \mu_{WL}(x_1) \wedge \mu_{WN}(x_2) \wedge \mu_N(x_3) \vee \\ & \mu_{WL}(x_1) \wedge \mu_{WN}(x_2) \wedge \mu_H(x_3) \vee \mu_N(x_1) \wedge \mu_L(x_2) \wedge \mu_H(x_3) \vee \mu_N(x_1) \wedge \mu_H(x_2) \wedge \mu_L(x_3) \vee \\ & \mu_H(x_1) \wedge \mu_{WN}(x_2) \wedge \mu_L(x_3) \vee \mu_H(x_1) \wedge \mu_{WL}(x_2) \wedge \mu_H(x_3) \vee; \end{aligned} \quad (3.21)$$

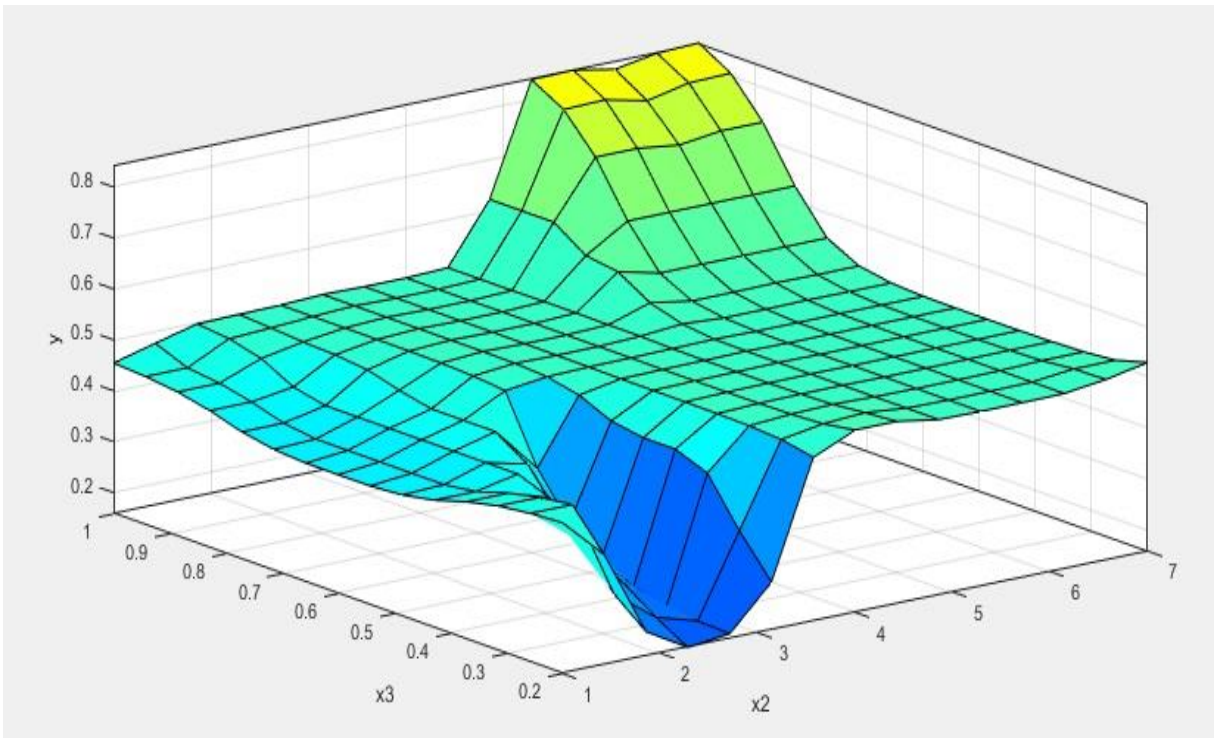
$$\begin{aligned} \mu_H(y) = & \mu_H(x_1) \wedge \mu_H(x_2) \wedge \mu_H(x_3) \vee \mu_H(x_1) \wedge \mu_H(x_2) \wedge \mu_N(x_3) \vee \mu_N(x_1) \wedge \mu_H(x_2) \wedge \\ & \mu_H(x_3) \vee \mu_H(x_1) \wedge \mu_N(x_2) \wedge \mu_H(x_3) \vee \mu_H(x_1) \wedge \mu_{WH}(x_2) \wedge \mu_H(x_3) \vee \mu_N(x_1) \wedge \mu_{WN}(x_2) \wedge \\ & \mu_H(x_3). \end{aligned} \quad (3.22)$$

Отримані системи нечітких рівнянь (3.20)...(3.22) є основою для побудови функції належності [153] нечітких оцінок впливу вхідних параметрів на надійність устаткування для імпульсного імпрегнування бетонних виробів.

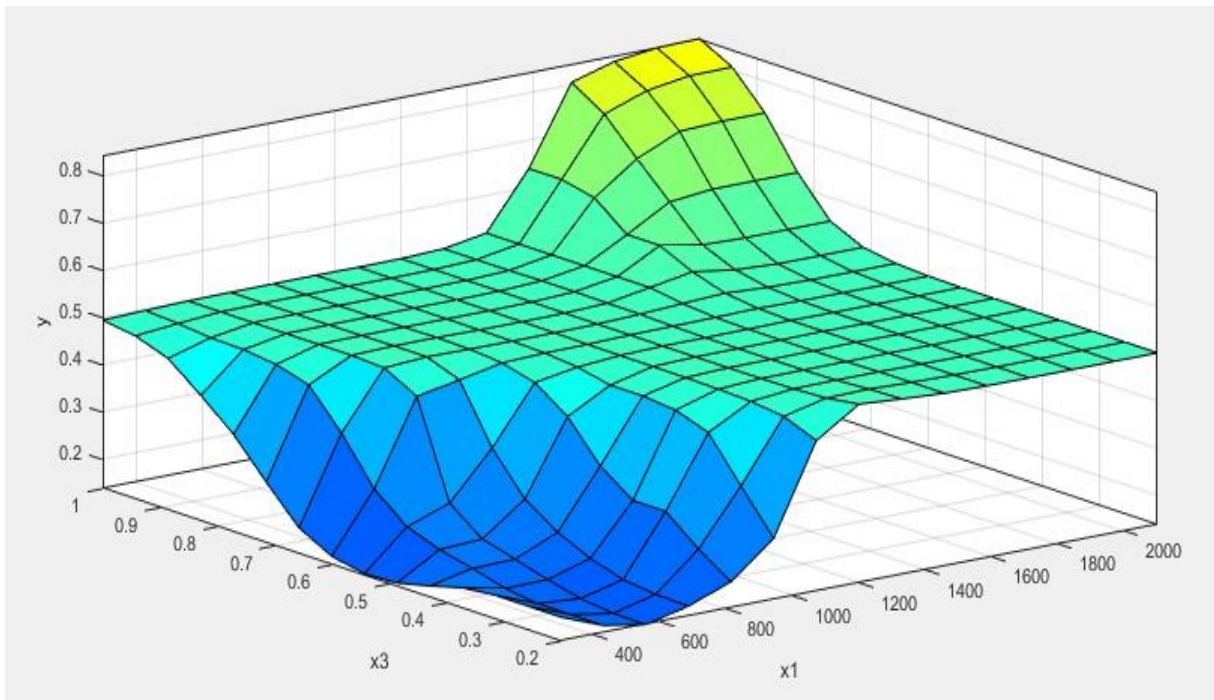
На підставі рішення матриць парних порівнянь були отримані функції належностей для всіх термів. Отримані результати функцій належності пронормовані на одиницю шляхом ділення на найбільший ступінь належності. Математичну оцінку процесу проводили з використанням програмного забезпечення MATLAB R2024a надбудова Fuzzy logic [154], результатом є графічні поверхні вихідних змінних (рис. 3.7).



a)



б)



в)

Рисунок 3.7 — Залежність технічного стану устаткування для імпульсного імпрегнування виробів із бетону від:

- а) повного робочого тиску та частоти імпульсів тиску;
- б) частоти імпульсів тиску та тривалості імпрегнування;
- в) тривалості імпрегнування та повного робочого тиску.

Прогнозування надійності устаткування для імпульсного імпрегнування бетонних виробів є необхідним елементом його проектування. Тонке налаштування моделі передбачає використання апарату генетичних алгоритмів, що забезпечить результат в залежності від вибірки.

3.4 Висновки до розділу 3

Серед основних показників імпульсного імпрегнування будівельних найбільш важливими є глибина проникнення просочувального складу, рівномірність розповсюдження просочувального складу в капілярно-пористій структурі матеріалу, швидкість руху просочувального складу.

Виконано математичне моделювання процесів проникнення просочувальних композицій в КПС бетону, що протікають під час імпульсного імпрегнування. В результаті чого отримано рівняння (3.17) і (3.18) для капіляра або розімкнутої пори, а також для замкнутої пори із затиснутим залишковим повітрям всередині, які відображають перепад тиску, спричинений застосуванням імпульсів тиску за прийнятим синусоїдальним законом, що зумовлює рух просочувальної композиції в КПС бетонного зразка. Завдяки математичному моделюванню встановлено зв'язок між втратами тиску в капілярі на подолання сил опору, в тому числі тертя його довжині, капілярним тиском і ударним тиском, який зумовлений імпульсами рідини.

Врахування густини та в'язкості просочувальної композиції, а також розмірів пор і капілярів дозволяє застосовувати математичну модель при імпрегнуванні бетонних зразків різної щільності та пористості просочувальними композиціями різного складу, які мають різні властивості.

На підставі проведеного аналізу з врахуванням теоретичних та експериментальних даних режиму роботи устаткування, оснащеного обладнанням для генерування імпульсів тиску, розроблено математичну модель для оцінювання технічного стану устаткування даного устаткування у процесі його експлуатації. Встановлено ієрархічні зв'язки між факторами для оцінювання надійності технічного стану і роботи устаткування на системному рівні з урахуванням кількісних та якісних ознак, що оцінюються лінгвістичними змінними. З метою оцінювання надійності устаткування сформовано експертні бази знань.

Використання методів нечіткої логіки дозволяє автоматизовано в режимі реального часу проводити моніторинг, виявляти та діагностувати причини відхилень фактичних характеристик під час експлуатації обладнання. Вчасне виявлення несправностей устаткування відкриває можливість здійснювати перехід від планово-ремонтних робіт до обслуговування обладнання за поточним технічним станом. Це створює підґрунтя для підвищення ефективності експлуатації устаткування для імпульсного імпрегнування виробів із бетону за рахунок збільшеного використання робочого ресурсу обладнання.

4 РОЗДІЛ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІМПУЛЬСНОГО ІМПРЕГНУВАННЯ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНУ

4.1 Водопоглинання та глибина імпрегнування дослідних зразків, імпрегнованих розчином метилсиліконату калію

Властивості зразків, які підлягали імпрегнуванню гідрофобізатором водним розчином метилсиліконату калію (46%) за запропонованим імпульсним методом, методом ВТВ та необроблених контрольних зразків встановлювались випробуванням водопоглинання за масою. Вимірювання водопоглинання проводилось шляхом визначення кількості води, яку поглинає зразок, що повністю занурений у воду. Для визначення кількості поглиненої води виконували порівняння маси сухого та насиченого водою дослідного зразка. Дослідні зразки представлені у вигляді балочок розміром 4×4×16 см, виготовлені способом, що описаний розділі 2 даної роботи. Після 28 діб твердіння дослідні зразки висушували у сушильній шафі при температурі 100±5°C до постійної маси. Зразки розміщували в посудині на сітці з метою зменшення контакту з дном посудини та мінімізації перешкоджання процесу поглинання води. Посудину наповнювали водою таким чином, щоб рівень води перевищував верхівки зразків приблизно на 50 мм, при температурі води 20±2°C. Зважування зразків проводили періодично. При досягненні різниці між двома поспіль зважуваннями менше 0,1%, вважалось, що дослідний зразок повністю насичений водою.

Обчислення величини водопоглинання дослідних зразків за масою проводили за такою формулою:

$$W_M = \frac{m_g m_c}{m_c} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

де m_g – маса водонасиченого дослідного зразка;

m_c – маса сухого дослідного зразка.

Глибина проникнення гідрофобізуючого складу в бетонні дослідні зразки є важливим показником, що свідчить про ефективність модифікації для забезпечення водонепроникності матеріалу. Даний параметр характеризує здатність просочувальної композиції проникати в пористу структуру бетону, створюючи водовідштовхувальний шар на певній глибині, який запобігає капілярному підняттю вологи та зменшує ризик утворення мікротріщин через цикли заморожування-відтавання. Оцінка глибини проникнення дозволяє визначити якість та довговічність гідрофобізуючого захисту, а також оптимізувати процес обробки, підібрати відповідний склад і технологію імпрегнування для конкретних умов експлуатації. Глибину проникнення гідрофобізатора всередину дослідних зразків визначали за отриманим зрізом внутрішньої поверхні розбитих балочок. Поверхню зрізу обприскували водою за допомогою пульверизатора, оцінюючи змочуваність бетону (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Змочені зразки бетону імпрегновані гідрофобізуючим складом:

- а) способом ВТВ (глибина проникнення близько 6-8 мм);
- б) способом імпульсного імпрегнування (наскрізне проникнення).

Ділянки дослідних зразків, що не змінювали колір та на яких утворювалися сферичні краплини води, вважалися такими, що не змочувалися. Ділянки дослідних зразків, що змінювали колір на темніший, були більш контрастними відносно початкового кольору та на яких не утворювалися сферичні краплини води, вважалися змочуваними, тобто такими, що поглинають воду. Глибину проникнення гідрофобізуючого складу оцінювали за змочуваністю ділянок. Вимірювання глибини проникнення гідрофобізатора виконували штангенциркулем цифровий Sigma з точністю вимірювання $\pm 0,02$ мм. За глибину проникнення було прийнято середній показник шести вимірювань.

Характеристики дослідних зразків бетону після імпрегнування силіконовим гідрофобізатором у віці 28 діб наведено у табл. 4.1. У таблиці позначено середнє значення показників, що імпрегновані імпульсним способом (ІМП середнє), відомим способом вакуум-тиск-вакуум (ВТВ середнє) та контрольних необроблених зразків (Контр. середнє).

Таблиця 4.1

Властивості бетонних зразків після імпрегнування гідрофобізатором

№ зразка	Водопоглинання за масою, %	Глибина імпрегнування, мм
1	1,53	20 (наскрізне проникнення)
2	1,77	20 (наскрізне проникнення)
3	1,32	20 (наскрізне проникнення)
4	0,92	20 (наскрізне проникнення)
5	0,87	20 (наскрізне проникнення)
6	1,72	20 (наскрізне проникнення)
ІМП середнє	1,36	20 (наскрізне проникнення)
ВТВ середнє	3,14	6...8
Контр. середнє	7,12	-

Отримані дані виявили зниження значення водопоглинання у зразків, що імпрегновані імпульсним методом, у середньому на 56,7% у порівнянні зі зразками, що імпрегновані способом ВТВ, і на 80,9% у порівнянні з контрольними зразками (рис. 4.2).

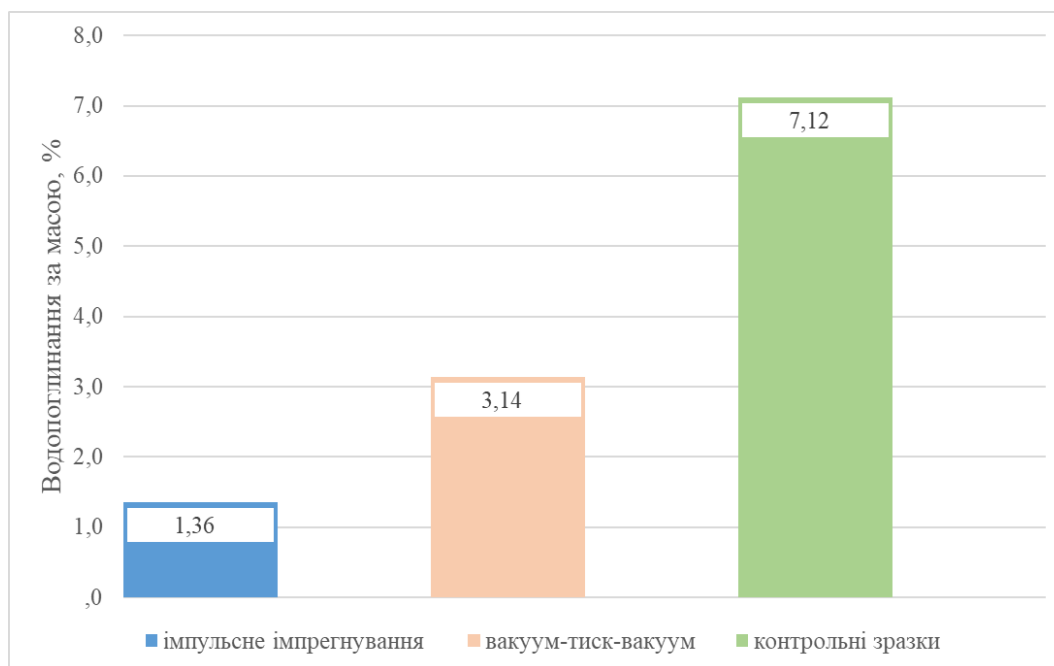


Рисунок 4.2 – Водопоглинання зразків бетону залежно від способу імпрегнування

Аналіз результатів експериментів з вивчення впливу запропонованого способу імпульсного імпрегнування та відомого способу ВТВ показав, що водопоглинання дослідних зразків, оброблених імпрегнуванням із застосуванням імпульсів тиску просочувальної композиції знизилось від 7,12% до 1,36%. Середнє значення водопоглинання бетону, просоченого способом ВТВ знизилася до 3,14% порівняно з вихідними контрольними зразками. Глибина проникнення гідрофобізуючого складу у товщу дослідних зразків, оброблених способом ВТВ близько 6 ... 8 мм. У зразків, що оброблені імпульсним способом, фіксувалося повне наскрізне просочення, враховуючи розміри зразків, це значення становить 20 мм.

4.2 Фізико-механічні властивості дослідних зразків, імпрегнованих рідким натрієвим склом

На даному етапі досліджується вплив способу імпрегнування на фізико-механічні властивості дослідних зразків з бетону, таких як приріст маси, межу міцності на стиск та межу міцності на згин. Дані для визначення механічних характеристик зразків отримували за результатами випробування на машині МП-100 (рис. 4.3) та на гідравлічному пресі ПСУ-10 (рис. 4.4) в лабораторних умовах за методикою, описаною у розділі 2 даної роботи.

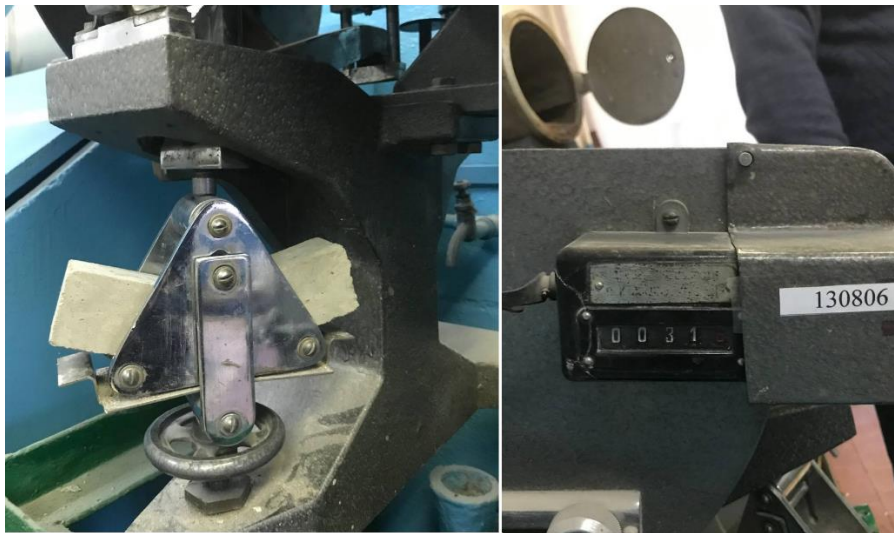


Рисунок 4.3 – Випробування зразків-балочок на згин



Рисунок 4.4 – Випробування зразків на стиск

Досліджувані характеристики зразків-балочок бетону після імпрегнування рідким натрієвим склом наведено в табл. 4.2. У таблиці позначено середнє значення показників, що імпрегновані імпульсним способом (ІМП середнє), відомим способом вакуум-тиск-вакуум (ВТВ середнє) та контрольних необроблених зразків (Контр. середнє).

Таблиця 4.2

Характеристики бетонних зразків після імпрегнування рідким склом

№ зразка	Приріст маси після імпрегнування, %	Міцність на стиск, МПа	Ступінь зміцнення на стиск, %	Міцність на згин, МПа	Ступінь зміцнення на згин, %
1	6,53	27,5	59,9	5,9	59,9
2	7,81	28,3	64,6	6,4	64,6
3	7,99	28,5	65,7	7,1	65,7
4	8,57	30,8	79,1	7,3	79,1
5	9,12	31,7	84,4	7,6	84,4
6	10,32	32,1	86,7	8,2	86,7
ІМП (середнє)	8,39	29,9	73,9	7,1	115,2
ВТВ (середнє)	5,13	25,3	47,1	5,3	60,7
Контр. (середнє)	-	17,2	-	3,3	-

Як видно з табл. 4.2, у зразків, імпрегнованих рідким натрієвим склом імпульсним методом, у порівнянні з імпрегнованими зразками способом ВТВ, спостерігається збільшення ступеню міцності на стиск та на згин в середньому на 18,2% та 34% відповідно.

Середній показник межі міцності на стиск зразків, що імпрегновані імпульсним способом становив 29,9 МПа, на згин — 7,1 МПа. У контрольних необроблених зразків дані показники становили 17,2 МПа і 3,3 МПа відповідно (рис. 4.5).

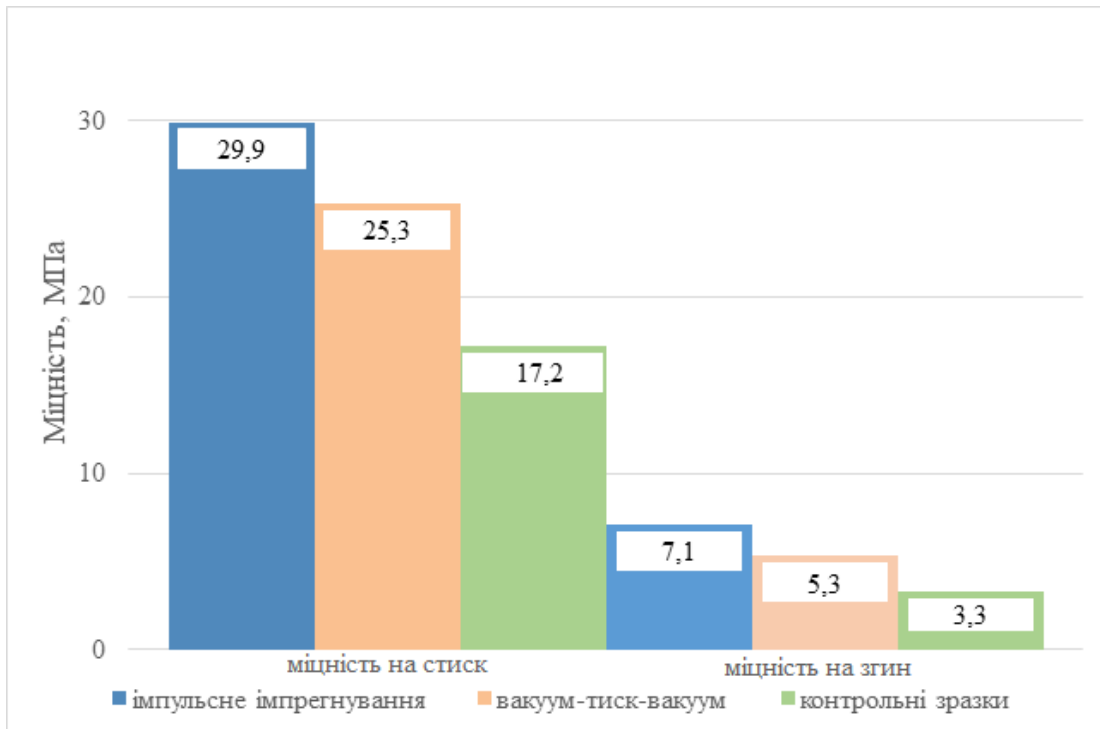


Рисунок 4.5 – Порівняння міцності бетону імпрегнованого рідким склом з контрольними зразками

Рисунки 4.6-4.9 відображають залежність межі міцності на стиск та на згин від приросту маси зразків, імпрегнованих рідким натрієвим склом різними способами.

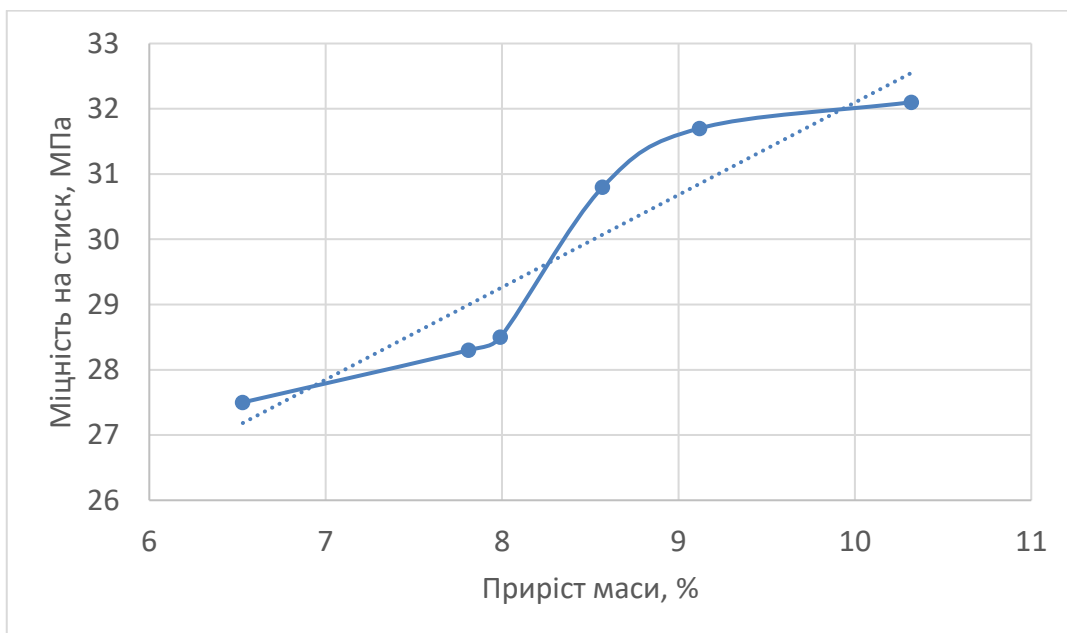


Рисунок 4.6 – Залежність міцності на стиск від приросту маси при імпульсному імпрегнуванні бетону рідким склом

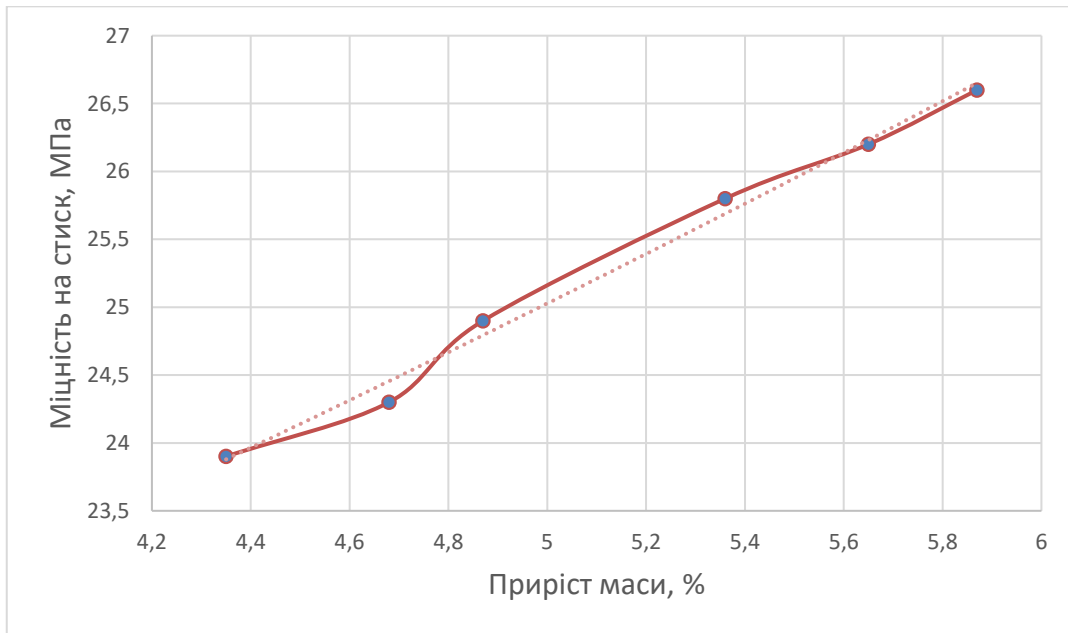


Рисунок 4.7 – Залежність міцності на стиск від приросту маси при імпрегнуванні бетону рідким склом способом ВТВ

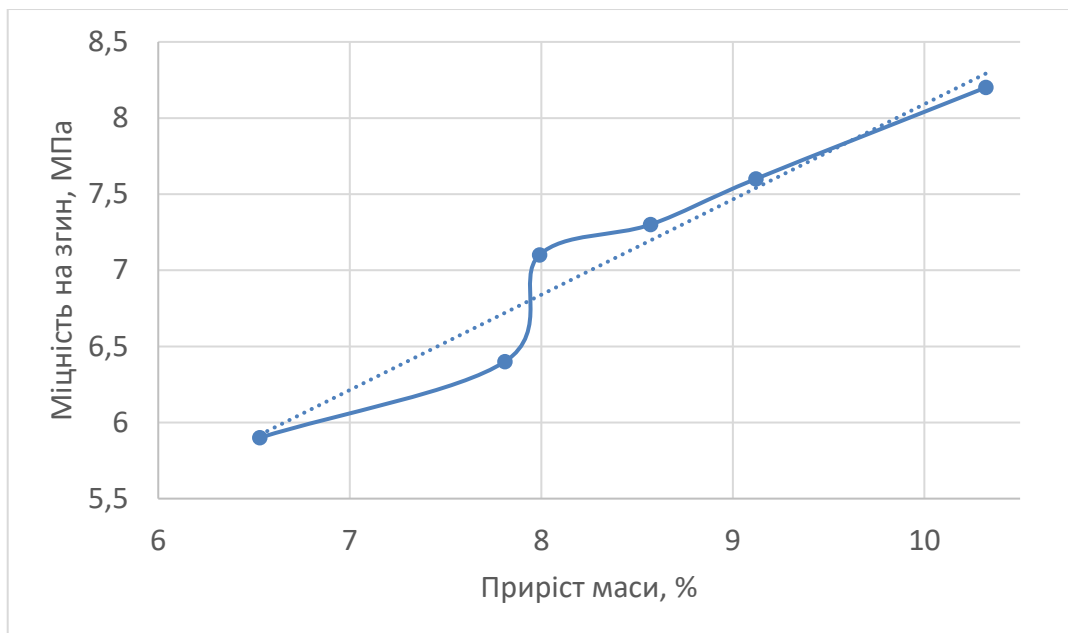


Рисунок 4.8 – Залежність міцності на згин від приросту маси при імпульсному імпрегнуванні бетону рідким склом

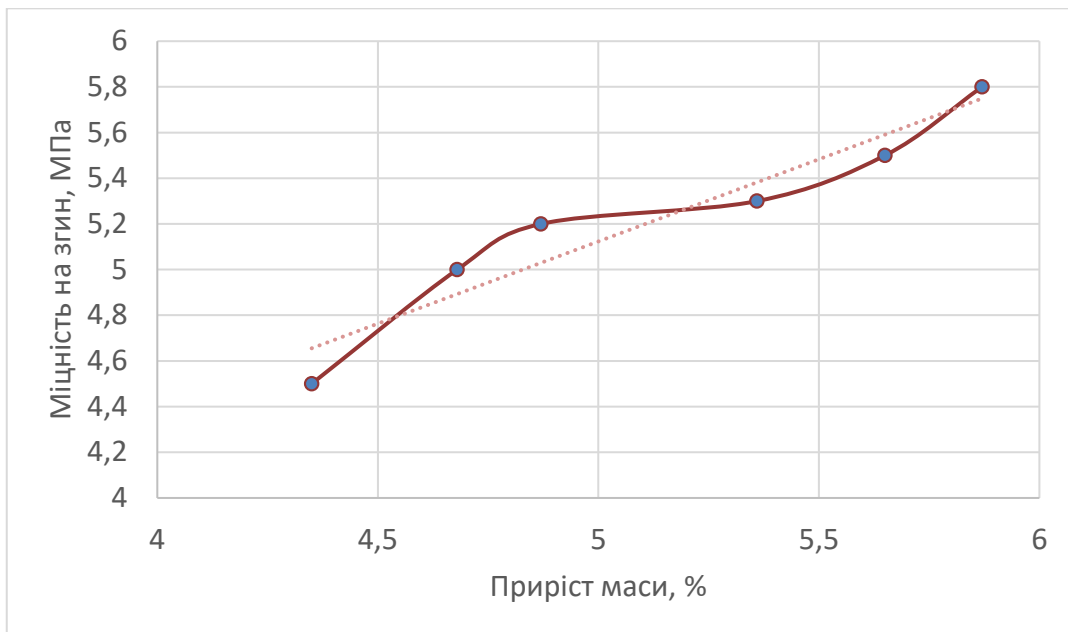


Рисунок 4.9 – Залежність міцності на згин від приросту маси при імпрегнуванні бетону рідким склом способом ВТВ

Нижче, на рис. 4.10, наведені зображення дослідних зразків бетону до та після імпрегнування рідким натрієвим склом.

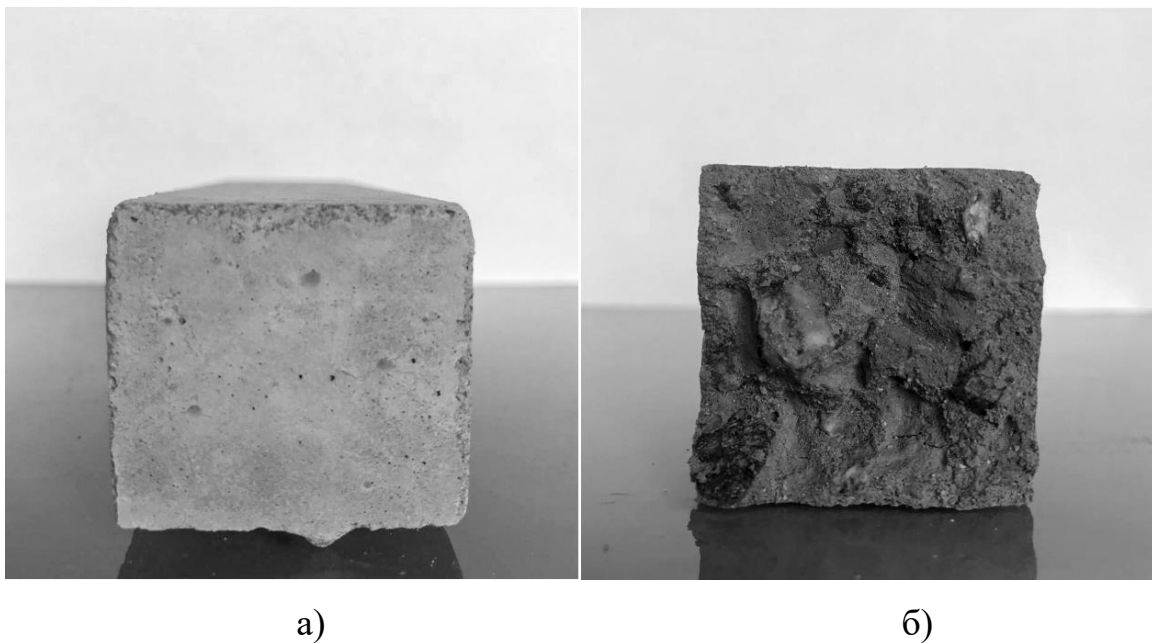


Рисунок 4.10 – Дослідні бетонні зразки:

а) зразок до модифікації; б) зразок імпрегнований імпульсним методом.

Аналіз даних експериментального дослідження показав, що імпрегнування бетонних зразків з $V/C = 0,5$ та $C/S = 1:5,5$ у віці 28 діб запропонованим імпульсним способом з такими параметрами імпульсного режиму обробки: величиною статичного надлишкового тиску 1200 кПа., частотою повторення імпульсів тиску 5 Гц, амплітудою тиску 300 ... 700, підвищує міцнісні показники бетону завдяки кращому проникненню просочувального складу в об'єм зразків, що характеризується приростом маси. В результаті імпульсного імпрегнування зразків середній приріст маси становив 8,39% відносно контрольних зразків. Приріст зразків, просочених способом ВТВ, становив 5,13% у порівнянні з контрольними. Імпрегнованому рідким натрієвим склом бетону властиві високі експлуатаційні показники внаслідок утворення заповнення його структури просочувальним складом та ущільнення матеріалу.

Отримані дані демонструють, що внаслідок імпульсного імпрегнування бетонних зразків рідким натрієвим склом ступінь збільшення його міцності міцність на згин проявляється у більшій мірі, аніж зміцнення на стиск. Причиною такого ефекту є значна залежність міцності до згину (розтягування) від зчеплення заповнювача з цементним каменем. Ефективна обробка бетону шляхом імпульсного імпрегнування дозволяє поліпшити зв'язок заповнювача з цементним каменем, внаслідок чого руйнування бетону відбувається здебільшого в зоні заповнювача.

4.3 Висновки до розділу 4

В результаті проведення експериментальних досліджень і обробки експериментальних даних зроблені такі висновки.

Показники водопоглинання дослідних зразків, при імпульсному імпрегнуванні бетону гідрофобізуючим розчином на основі силікону, знизилися на 56% порівняно зі зразками, просоченими способом ВТВ.

Встановлені дослідні дані демонструють позитивний вплив імпульсної складової тиску на збільшення глибини та досягнення однорідності проникнення

просочувальної композиції в капілярно-пористу структуру бетону. Досліджені характеристики модифікованого бетону свідчать про те, що розроблено технологію експериментальний стенд, які забезпечують модифікацію бетону з властивостями, які є значно вищими за типовий бетон. В результаті імпульсного імпрегнування дослідних зразків було зафіксовано наскрізне проникнення гідрофобізуючого складу. У випадку з використанням способу ВТВ, глибина проникнення становила 6 ... 8 мм.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили гіпотезу щодо збільшення глибини проникнення просочувальних композицій із застосуванням імпульсного імпрегнування та устаткування для його здійснення, яке генерує додаткову ударну пульсуючу складову тиску на стаціонарний потік просочувальної композиції. Експериментальний стенд апарату для імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів, показав достатню працездатність та можливість регулювання параметрів устаткування (тиску, частоти повторюваності імпульсів тиску просочувальної композиції, амплітуди тиску), вплив яких досліджувався при теоретичних дослідженнях.

Отримані експериментальні зразки демонструють, що при застосуванні імпульсів тиску досягається збільшення проникності просочувальних складів та ступінь заповнення об'єму оброблюваних зразків, що характеризується приростом маси, який при застосуванні імпульсного імпрегнування становив 8,39% і при застосуванні імпрегнування способом ВТВ становив 5,13%. Це справляє позитивний ефект на фізико-механічні характеристики модифікованих матеріалів, зокрема, ступінь міцності бетону, просоченого рідким натрієвим склом, збільшився на 18,2% на стиск та на 34% при випробуваннях на згин у порівнянні з методом ВТВ.

Отримані результати можуть бути використані для розробки та вдосконалення технологій модифікації бетонних виробів і встановленню конкретного діапазону параметрів, що сприятиме підвищенню якості будівельних виробів та конструкцій з бетону.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИНТЕЗ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ МОДИФІКАЦІЇ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ ІЗ БЕТОНУ ШЛЯХОМ ІМПУЛЬСНОГО ІМПРЕГНУВАННЯ. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО ІМПРЕГНУВАННЯ

5.1 Обґрунтування обраного методу модифікації будівельних виробів

На підставі здійсненого аналітичного огляду в розділі 1, встановлено, що найбільш ефективним і перспективним є метод модифікації будівельних матеріалів та виробів, зокрема бетону, шляхом імпрегнування із застосуванням тиску, а саме обробка будівельних матеріалів та виробів методом імпульсного імпрегнування. Даний метод має ряд переваг у порівнянні з іншими методами, які проаналізовані у розділі 1.

5.2 Імпульсна технологія модифікації будівельних виробів із бетону

В НДІ Гідродинаміки Вінницького національного технічного університету було розроблено нову технологію імпульсного імпрегнування просочувальними композиціями будівельних виробів із бетону для поліпшення їхніх фізико-механічних властивостей. Запропонований спосіб виготовлення бетонополімерних виробів, захищений патентом України на корисну модель [155], здійснюється наступним чином [155, 156].

Крок 1. Підготовка виробів із бетону до сушіння. Виконують очищення поверхні зразків від забруднень.

Крок 2. Розміщення бетонних виробів у сушильній печі.

Крок 3. Сушіння бетонних виробів. Операцію проводять у дві стадії: спочатку бетонні вироби сушать протягом 8 год за температури +105 °С, після чого знову повторно здійснюють сушіння виробів за температури +300 °С з

тривалістю до 3-х год. Друга стадія сушіння виконується з метою досягнення вологості бетонних виробів не більше 1 %.

Крок 4. Розвантаження сушильної печі.

Крок 5. Завантаження робочої (просочувальної) камери висушеними бетонними виробами. Вироби розміщують у робочій камері на відстані один від одного таким чином, щоб між ними утворювалися проміжки певного об'єму, ширина яких орієнтовно повинна відповідати ширині зразків. Такий прийом виконується для забезпечення можливості надходження у дані проміжки просочувального складу.

Крок 6. Герметизація робочої камери.

Крок 7. Здійснення вакуумування шляхом створення розрідження величиною від 6 кПа до 15 кПа протягом заданої тривалості, залежно від розмірів бетонних виробів, об'єму робочої камери, вихідних властивостей просочувального складу та бетонних виробів.

Крок 8. Підготовка просочувального складу. Змішують просочувальний склад (мономер) з ініціатором полімеризації та підтримка його температури у межах +8 ... +12 °С залежно від різновиду просочувального складу.

Крок 9. Заповнення робочої камери просочувальним складом. Робочу камеру з бетонними зразками повністю заповнюють просочувальним складом, змішаним із ініціатором полімеризації.

Крок 10. Завершення процесу вакуумування. Встановлення атмосферного тиску у робочій камері.

Крок 11. Створення надлишкового рідинного тиску заданої величини протягом заданого часу.

Крок 12. Застосування імпульсного режиму імпрегнування. Створюють імпульси тиску рідини (мономера), з почерговою зміною заданої величину тиску у робочій камері із заданою частотою повторення імпульсів тиску рідини. Процес імпрегнування в імпульсному режимі відбувається до досягнення необхідної величини проникнення просочувального складу всередину бетонних виробів.

Крок 13. Вимикання імпульсного режиму імпрегнування. Стабілізація величини надлишкового рідинного тиску.

Крок 14. Зниження тиску у робочій камері до рівня атмосферного тиску.

Крок 15. Зливання залишків мономера з робочої камери. Процес імпрегнування бетонних виробів завершено.

Крок 16. Підготовка гліцерину шляхом підігріву до температури +70...+80 °С.

Крок 17. Заповнення робочої камери з бетонними виробами гліцерином з метою забезпечення термokatалітичної полімеризації мономера в структурах бетону. Даний процес відбувається протягом заданої тривалості термokatалітичної полімеризації з підтримкою температури гліцерину нагрівачами.

Крок 18. Завершення термokatалітичної полімеризації мономера. Зливають залишки гліцерину.

Крок 19. Вакуумування бетонополімерних виробів. Створення розрідження у робочій камері з виробами із заданою глибиною розрідження протягом заданої тривалості. Дану процедуру виконують для видалення парів мономера, які утворилися на етапі проходження термokatалітичної полімеризації.

Крок 20. Завершення вакуумування та підвищення тиску в робочій камері з імпрегнованими бетонополімерними виробами до атмосферного.

Крок 21. Розгерметизація робочої камери.

Крок 22. Видалення готової продукції — бетонополімерних виробів.

Застосування сушіння та вакуумування сприяє мінімізації наявності вологи та повітря в КПС бетону перед його імпрегнуванням. Створення надлишкового тиску після вакуумування, як і у способах ВТВ і ТТВ ініціює процес імпрегнування виробів, а застосування режиму імпульсної обробки справляє позитивний ефект на підвищення проникності просочувальної композиції у бетон, збільшує глибину імпрегнування, чим інтенсифікує процес просочення. Окрім того, використання імпульсів тиску дозволяє просочувальному складу

рівномірно заповнювати пори та мікротріщини бетону. Технологічна схема виготовлення бетонополімерів шляхом імпрегнування виробів із бетону представлено на рис. 5.1.

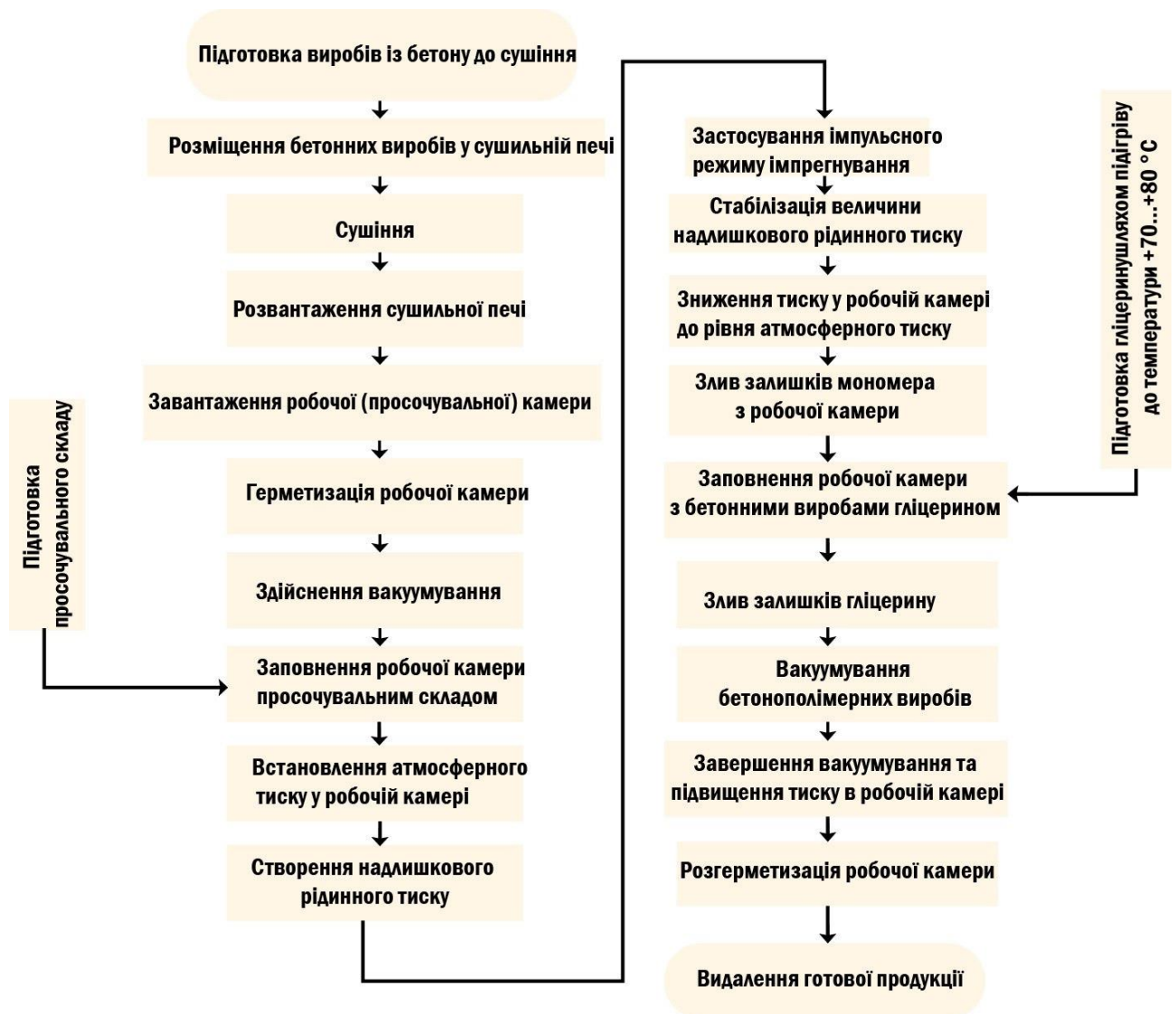


Рисунок 5.1 – Технологічна схема процесу виготовлення бетонополімерів

Технологічні процеси запропонованого способу імпульсного імпрегнування виробів із бетону у відношенні тиску та тривалості обробки можуть бути представлені діаграмою (рис. 5.2), а особливості застосування імпульсного режиму тиску відображені у спрощеному вигляді графіком (рис. 5.3).

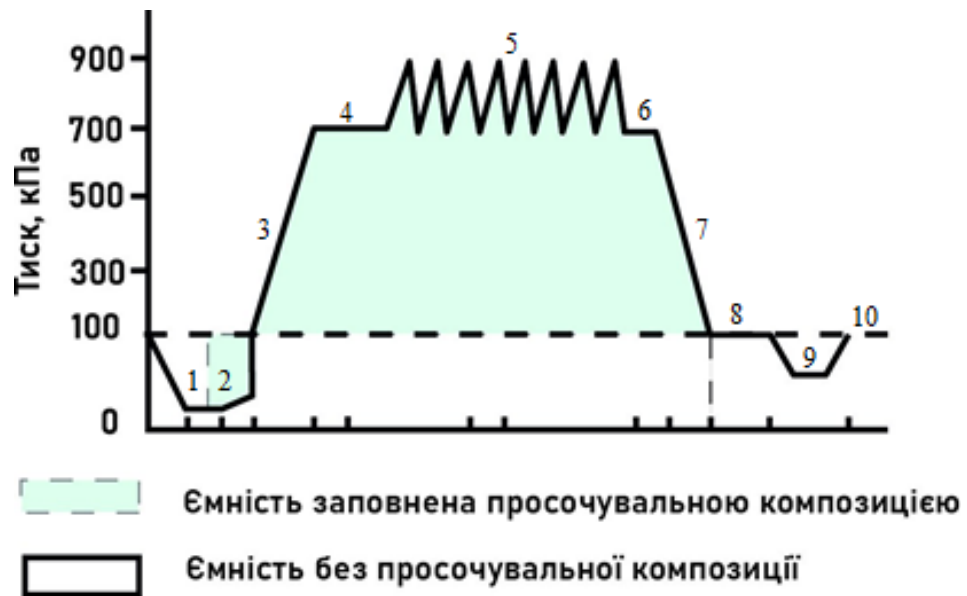


Рисунок 5.2 — Діаграма запропонованого способу імпульсного імпрегнування виробів із бетону: 1 - вакуумування, 2 - заповнення робочої камери просочувальним складом, 3 - створення надлишкового тиску, 4 - витримка під тиском, 5 – режим імпульсів тиску рідини, 6 – стабілізація тиску рідини, 7 - зниження тиску до атмосферного, 8 - злив просочувального складу, 9 - вакуумування, 10 - відновлення атмосферного тиску та розгерметизація

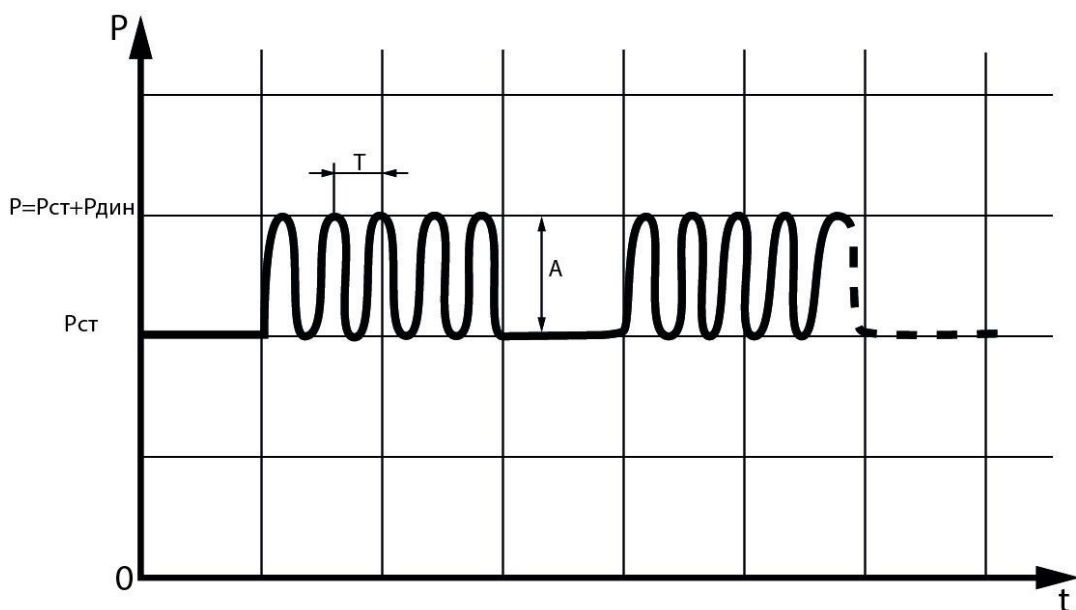


Рисунок 5.3 – Спрощений графік зміни тиску під час імпрегнування:
 T – період; A – амплітуда тиску; $P_{ст}$ – стаціонарний постійний тиск;
 $P_{дин}$ – динамічний тиск

Основні параметри режиму імпульсної подачі тиску просочувального складу характеризують такими основними параметрами: частотою повторень тиску рідини, величиною тиску та амплітудою його зміни, тривалістю процесу імпульсної обробки. Найбільша ефективність використання запропонованої технології імпульсного імпрегнування будівельних виробів із бетону буде досягнута за можливості регулювання вказаних параметрів обладнання залежно від різновиду бетону, а також типу просочувальної композиції.

5.3 Перспективи застосування технології імпульсного імпрегнування будівельних виробів

Будівельні вироби з бетону, модифіковані методом імпульсного просочення, мають потенціал для широкого застосування у різних сферах будівництва завдяки підвищеній стійкості до вологи, зниженню водопоглинання та покращеним фізико-механічним властивостям.

Транспортна інфраструктура. Модифіковані вироби з бетону можуть бути використані для виготовлення, модифікування та ремонту збірних елементів аеродромних покриттів, дорожнього одягу, тротуарних плит, дорожніх і тротуарних бордюрів, залізничних бетонних шпал тощо. Модифікація таких елементів забезпечить покращенні показники міцності, зменшене водопоглинання, що в результаті створить передумови для тривалої експлуатації в умовах постійного механічного навантаження та впливу атмосферних факторів.

Гідротехнічне будівництво. Завдяки покращеній водонепроникності модифіковані бетонні вироби можуть бути застосовані як складові гідротехнічних споруд та об'єктів водної інженерії. Це можуть бути плити для облицювання дна та укосів каналів, залізобетонні безнапірні лотки, напірні трубопроводи, які витримують тривалий контакт з водою та агресивними середовищами.

Покрівельні та огорожувальні конструкції. Високі міцнісні характеристики дозволяють використовувати такі бетонні вироби як складові покрівельних систем: парапети, водостоки та декоративні захисні елементи. Модифіковані бетонні елементи забезпечують надійний захист конструкцій від руйнування під дією атмосферних опадів, а також циклів заморожування-відтавання.

Архітектурно-декоративні елементи. Імпульсний спосіб імпрегнування підвищує сприяє підвищенню експлуатаційних характеристик бетонних огорожувальних елементів, таких як накриття для парканів, підпірні стінки, елементи фасадного декору. Це особливо важливо для зовнішніх архітектурних конструкцій, які постійно піддаються впливу навколишнього середовища. Крім того, запропонований спосіб обробки імпульсами тиску може бути адаптований для надання бетонним виробам різноманітного забарвлення за рахунок введення барвників до просочувальних складів.

Збірні елементи конструкцій фундаментів. Технологію імпульсного імпрегнування можна рекомендувати для модифікування фундаментних блоків або інші елементи, які контактують із ґрунтом. Підвищена стійкість до вологи, зменшена проникність, що сприяє збільшенню стійкості до агресивного ґрунтового середовища, зменшує ризик руйнування таких конструкцій та подовжує їхній термін служби.

Таким чином, бетонні вироби, оброблені імпульсним просоченням, мають значний потенціал для підвищення надійності та довговічності в різних сферах сучасного будівництва.

Окрім традиційного бетону, технологія імпульсного імпрегнування може бути застосована для покращення властивостей деяких інших будівельних матеріалів капілярно-пористої будови, наприклад: цегли, каменю, ніздрюватих бетонів, гіпсу, деревини.

У роботі [158], опублікованої автором проведено експериментальне дослідження збільшення проникності легкопроникних матеріалів, а саме хвойних порід деревини, і запропоновано спосіб модифікації деревини шляхом

імпульсного імпрегнування. На першому етапі проводять попереднє сушіння деревини для зниження рівня вологості до оптимального. Сушіння проводять при нормальному режимі за температури $+60 \dots +100^{\circ}\text{C}$ залежно від породи деревини до досягнення вологості нижче 20%. Після чого розміщують зразки деревини у робочій камері, де проводять вакуумування з метою видалення повітря та вологи з пор деревини. Вакуумування виконують зі зниженням тиску до величини розрідження в залежності від типу деревини із заданою тривалістю. Наступним етапом робочу камеру заповнюють попередньо підігрітою просочувальною композицією, вирівнюючи тиск у камері до атмосферного. В цей момент розпочинається процес проникнення просочувальної рідини в у верхній шар деревини. Як згадувалося у розділі 1, вибір типу просочувальної композиції залежить від необхідних для покращення властивостей деревини. Для зменшення водопоглинання та надання деревині водовідштовхувальних властивостей використовуються гідрофобізатори, для підвищення вогнестійкості використовуються антипірени, для поліпшення біологічної стійкості застосовуються антисептики, а з метою поліпшення фізико-механічних властивостей використовуються мономері та полімери [159]. Наступним етапом проводять підвищення тиску до надлишкового до досягнення заданої величини. Дана технологічна операція інтенсифікує нагнітання технологічного складу в структуру деревини. Після заданого часу витримки під надлишковим тиском за створюють імпульси тиску просочувальної рідини. Імпульси тиску інтенсифікують процес імпрегнування, забезпечують більш глибоке та рівномірне проникнення рідини у структуру деревини. Імпульсний режим тиску передбачає створення почергової стрибкоподібної зміни заданої величини тиску у просочувальній камері. Зміна тиску відбувається з певною попередньо заданою частотою повторення імпульсів тиску. Імпрегнування деревини в імпульсному режимі відбувається до досягнення потрібних показників проникнення просочувальної композиції у товщу деревини і залежить від типу деревини, а також від типу просочувальної композиції. Після завершення імпульсного режиму роботи обладнання виконують стабілізацію тиску, його пониження до

атмосферного та злив залишків технологічної рідини з просочувальної камери. На даному етапі завершується процес імпрегнування. Після цього проводять додаткове вакуумування деревини із заданою глибиною розрідження протягом заданої тривалості, залежно від породи деревини, з метою видалення парів просочувальної рідини, що утворилися в порах деревини у процесі імпрегнування, а також підсушування імпрегнованих зразків. По завершенню додаткового вакуумування у просочувальній камері з деревиною встановлюють атмосферний тиск, проводять розгерметизацію і видаляють готову модифіковану деревину для подальшої обробки чи використання. У випадку використання мономерів в ролі просочувальної композиції, після етапу імпрегнування, проводять заповнення спеціальної камери з деревиною гліцерином, попередньо підігрітим до $+70...+94^{\circ}\text{C}$. Внаслідок чого відбувається термokatалітична полімеризація мономера всередині деревини. Температуру гліцерину підтримують за допомогою нагрівачів. Після завершення термokatалітичної полімеризації мономера залишки гліцерину зливають і далі проводять додаткове вакуумування модифікованої деревини із заданою глибиною розрідження, щоб видалити пари мономера, які утворилися під час термokatалітичної полімеризації. По завершенню вакуумування у просочувальній камері встановлюють атмосферний тиск, проводять розгерметизацію та видаляють готові модифіковані зразки деревини. Запропонований спосіб імпрегнування деревини можна реалізувати з використанням устаткування для циклічного гідротермічного насичення будівельних виробів [160].

Застосування імпульсного тиску рідини також позитивно впливає на рівномірне та глибоке проникнення просочувальних складів у структуру деревини, що дозволяє заповнювати пори та мікротріщини матеріалу. Ця технологія може значно покращити водо-, біо- та вогнестійкість, механічні характеристики деревини, забезпечуючи захист від зовнішніх впливів і продовжуючи термін служби матеріалу.

5.4 Принципові та конструктивні схеми імпульсного устаткування для імпрегнування будівельних матеріалів

При розробці конструктивних схем устаткування для модифікування будівельних матеріалів шляхом імпульсного імпрегнування керувалися наступними критеріями:

- простота і надійність обладнання;
- забезпечення максимальної глибини проникнення просочувальної композиції у структуру матеріалів, що піддаються обробці;
- зменшення тривалості обробки будівельних матеріалів;
- збільшення продуктивності устаткування;
- підвищення якості вихідної продукції;
- можливість застосування різних технологічних рідин в ролі просочувальних композицій;
- простота використання та обслуговування обладнання;
- можливість зміни та налаштування параметрів.

Ключові процеси під час імпрегнування матеріалів зі застосуванням тиску відбуваються у просочувальній або, як її ще називають, робочій камері. За процеси створення вакууму відповідає система вакуумування. У пристроях, що реалізують повнокамерну технологію імпрегнування із застосуванням рідинного тиску головна роль відводиться системі нагнітання технологічного (просочувального) складу.

Блок-схема типового обладнання для імпрегнування будівельних матеріалів та виробів із застосуванням тиску представлена на рис. 5.4.

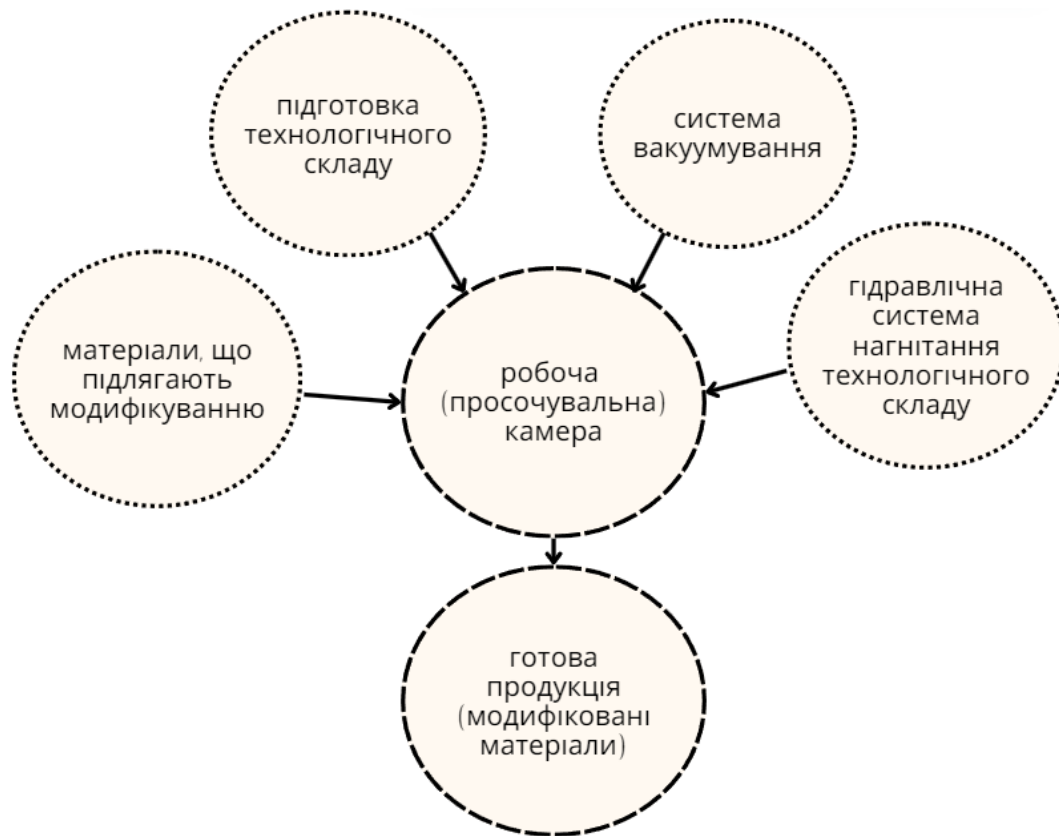


Рисунок 5.4 – Структурна схема обладнання для імпрегнування

В НДЛ Гідродинаміки ВНТУ було розроблено конструкцію устаткування для імпрегнування бетонних та залізобетонних виробів у якій вдосконалена конструкція робочої камери, а гідравлічна система нагнітання технологічного складу, з-поміж іншого, оснащена генератором імпульсів тиску рідини. Установа для циклічного гідротермічного насичення бетонних та залізобетонних виробів складається з маневрової камери, призначеної для зберігання підготовки, зберігання та зливу залишків просочувального складу; робочої камери в якій безпосередньо відбувається процес імпрегнування матеріалів; трубопроводів, а саме: напірних ліній, якими з'єднане насосне обладнання з робочою камерою та генератором імпульсів рідини, зливної лінії, яка з'єднує робочу та маневрову камери, а також вакуумної лінії, яка сполучає вакуумний насос із робочою камерою. Крім того, в установці [161] (рис. 5.5) передбачається підігрів та зовнішня теплова ізоляція.

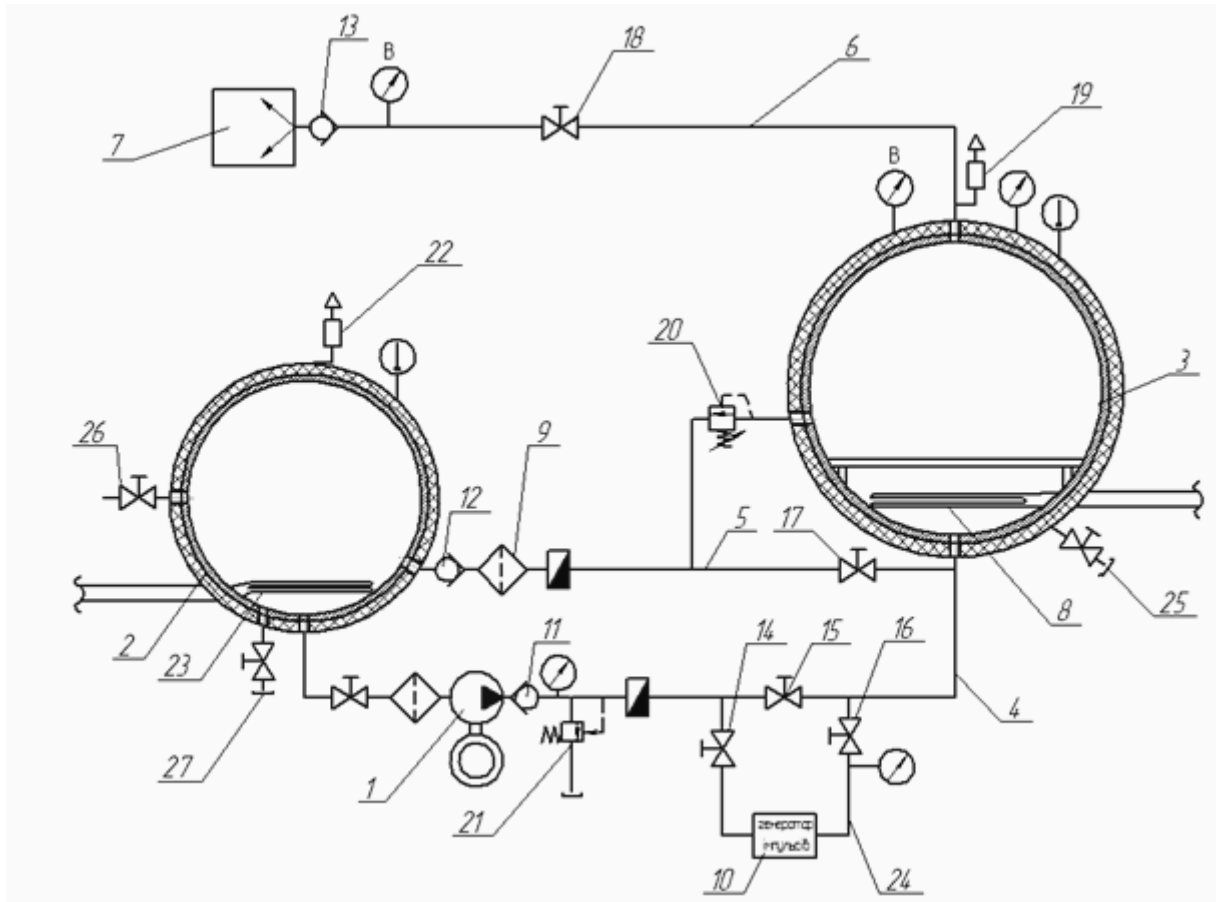


Рисунок 5.5 – Принципова схема установки для імпрегнування будівельних матеріалів

Працює запропонована установка [162] таким чином. Після завантаження бетонних та залізобетонних виробів, які підлягають насиченню, до робочої камери 3 вмикається рідинний насос 1, який через перший зворотній клапан 11, перший 5 запобіжний клапан 21 і систему напірного трубопроводу 4, при відкритій першій засувці 15 і закритих другій, третій, четвертій, п'ятій засувках 14, 16, 17, 18 заповнює робочу камеру 3 мономером із маневрової камери 2. В процесі заповнення робочої камери 3 повітря, що залишилось у ній, видаляється через дихальний клапан 19. Рідинний насос 1, що повністю заповнив мономером робочу камеру 3, створює у ній проектний статичний тиск, після чого 10 відключається. Одночасно з цим відкривається третя засувка 16 і закривається перша засувка 15. Далі включається у роботу генератор імпульсів 10, через обвідну лінію 24 і напірний трубопровід 4 створює імпульси тиску заданих

параметрів у робочій камері 3. Робота генератора імпульсів 10 та рідинного насоса 1 виконується почергово, з інтервалами часу, заданими проектом. В процесі насичення виробів терморегулятор із трубчастим електричним 15 нагрівачем 8 підтримує задану температуру мономера в робочій камері 3. При перевищенні проектних величин тиску, відбувається скид надлишкової кількості мономера через другий запобіжний клапан 20, який сполучений зі зливним трубопроводом 5. Після завершення процесу насичення генератор імпульсів 10, рідинний насос 1 відключаються, перша та третя засувки 15, 16 перекриваються. Далі відкривається четверта засувка 17 і залишок мономера по зливному 20 трубопроводу 5 перетікає до маневрової камери 2 через фільтр 9 та другий зворотній клапан 12, де змішується із підготовленим мономером. В процесі змішування залишку мономера з підготовленим мономером залишок повітря в маневровій камері 2 видаляється через дихальний клапан 22, а задана температура мономера підтримується трубчастим електричним нагрівачем 23. Після повного зливу залишкової кількості мономера четверта засувка 17 перекривається 25 одночасно з відкриттям п'ятої засувки 18. Далі в роботу вмикається вакуум-насос 7, що виконує вакуумування робочої камери 3 через вакуумну лінію 6 і третій зворотній клапан 13. Після завершення процесу вакуумування вакуум-насос 7 відключається. Далі проводиться розгерметизація і видалення продукції із робочої камери 3.

Окрім того, запропоновано декілька варіантів конструкцій генератора імпульсів тиску, яким можуть бути обладнані установки для імпрегнування або апарати для ін'єктування просочувальних композицій у капілярно-пористі середовища. Принципова схема генератора імпульсів тиску I, що захищений патентом України на корисну модель, наведена на рис. 5.6 [163].

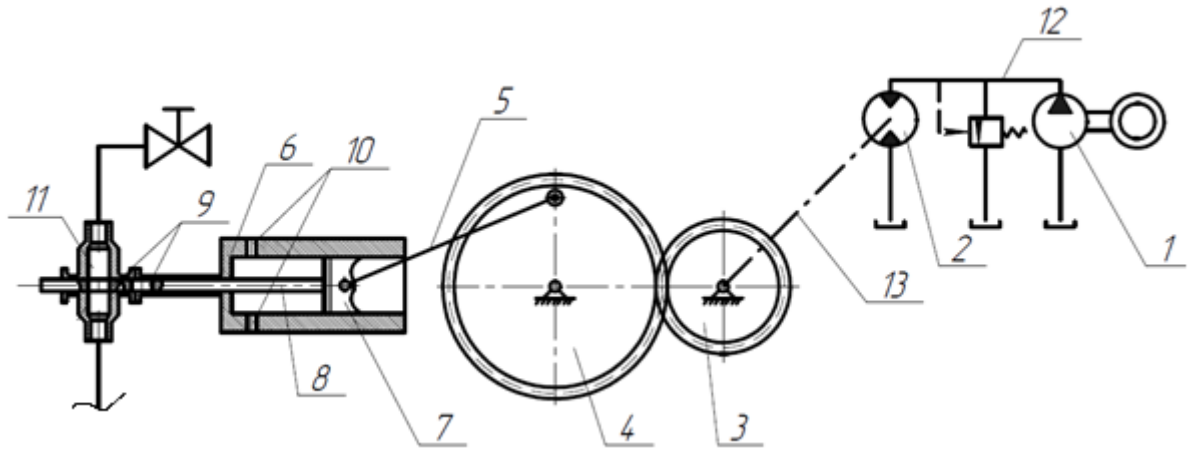


Рисунок 5.6 – Принципова генератора імпульсів тиску I

Генератор імпульсів I [163] містить рідинний насос 1, гідромотор 2, встановлений на валу кривошипно-шатунного механізму 13, гідравлічну лінію 12. Маховик, що виконаний у вигляді веденого зубчастого колеса 4, з'єднаний через зубчасту передачу з ведучою шестернею 3, яка встановлена на приводному валу. Шатун 5 з'єднує маховик 4 з поршнем 7, що встановлений в середині циліндра 6 з дренажними отворами 10. Перфорований шток 8, встановлений з можливістю періодичного закриття-відкриття циліндричної порожнини для подачі технологічного складу 11 і має отвори 9, які відповідають її діаметру.

Просочувальна композиція з маневрової камери під певним тиском подається в циліндричну порожнину для подачі технологічного розчину 11, яка закрита перфорованим штоком 8. Стаціонарний потік даного розчину заповнює закриту циліндричну порожнину для подачі технологічного розчину 11 і тиск у ній зростає. При увімкненні рідинного насосу 1 робоча рідина по гідравлічній лінії 12 подається на вхід до гідромотора 2, внаслідок чого на валу кривошипно-шатунного механізму 13 виникає крутний момент, який зумовлює обертання ведучої шестерні 3. Внаслідок зубчастої передачі, обертання ведучої шестерні 3 приводить в обертовий рух ведене зубчасте колесо 4. Ведене зубчасте колесо 4, виконуючи обертовий рух, за допомогою шатуна 5 штовхає поршень 7 і змушує поршень 7 виконувати зворотно-поступальний рух в циліндрі 6. Повітря, що міститься в циліндрі 6, під дією надлишкового тиску, який утворюється в

результаті зворотно-поступального руху поршня 7, видаляється через дренажні отвори 10. Рух поршня 7 призводить до переміщення жорстко закріпленого на ньому перфорований штока 8. Зворотно-поступальний рух, який виконує перфорований шток 8 з отворами 9 на ньому, зумовлює періодичне перекриття-відкриття площі поперечного перерізу циліндричної порожнини для подачі технологічного розчину 11. При цьому стаціонарний потік технологічного розчину (просочувального складу) отримує імпульси із встановленою періодичністю, яка регулюється частотою обертання гідромотора 2.

Варто відзначити, що у даній в конструкції генератора імпульсів тиску не достатньо комфортні умови керування робочою частотою і надлишковим тиском рідини для подачі імпульсів.

Автором була також розроблена вдосконалена конструкція пристрою для генерації імпульсів тиску II, принципова схема якого наведена на рис. 5.7 [164].

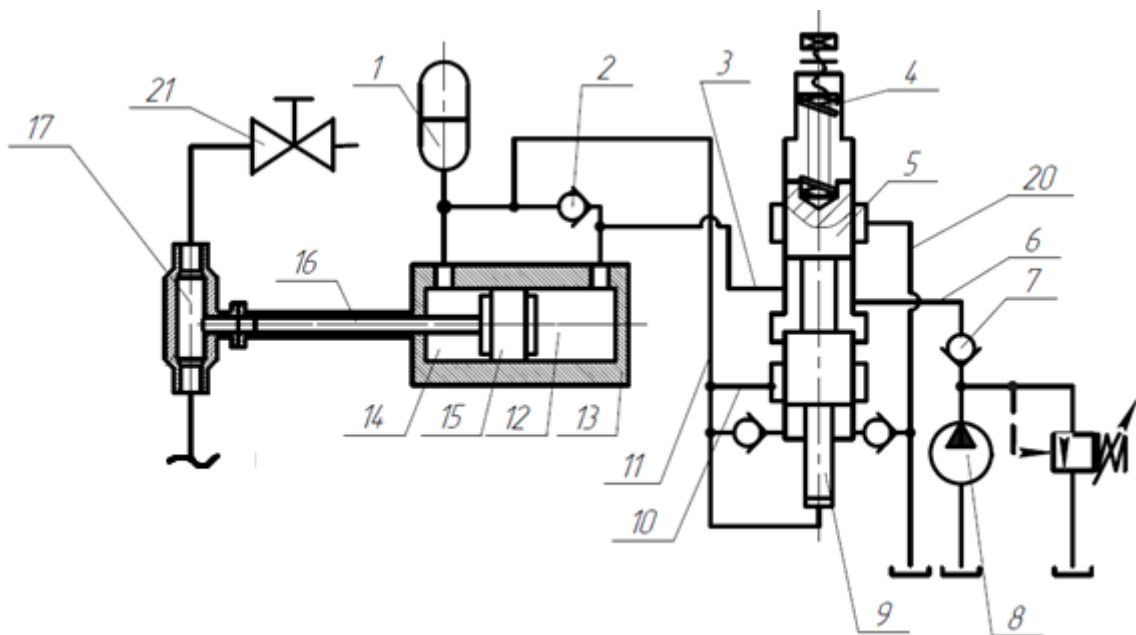


Рисунок 5.7 – Принципова генератора імпульсів тиску II

Пристрій містить такі елементи [164]. Привідний рідинний насос 8, який служить для подачі робочої рідини через зворотний клапан 7 до трубопроводу 6, з'єднаного через розточку двоходового золотника керування 5, причому

золотник керування налаштований на зусилля регульованої пружини 4. Крім того, трубопровід 6 з'єднаний через трубопровід 3 з поршневою порожниною 12 гідроциліндра 13, а також трубопровід 6 сполучений через зворотний клапан 2 зі штоковою порожниною 14 гідроциліндра 13 і гідроаккумулятором 1. Робочий поршень 15 розташований всередині гідроциліндра 13, що виконаний з можливістю переміщення по заданій траєкторії під дією робочого тиску в поршневій порожнині 12. Шток 16 закріплений на робочому поршні 15 і виконаний з можливістю періодичного перекриття-відкриття циліндричної порожнини 17. Плунжер 9 служить для переміщення золотника керування 5 і сполучений через трубопровід 11 з гідроаккумулятором 1. Трубопровід 10 виконує функцію подачі робочої рідини в підторцеву порожнину золотника. Крім того, пристрій містить зливну магістраль 20, призначену для зливу робочої рідини.

Просочувальна композиція з під певним тиском подається через засувку 21 в циліндричну порожнину 17. Після запуску приводного рідинного насоса 8 робоча рідина подається через зворотний клапан 7 у нагнітальний трубопровід 6. Через розточку двоходового золотника керування 5 і трубопровід 3 робоча рідина заповнює поршневу порожнину 12, що міститься в гідроциліндрі 13. У той же час, робоча рідина через зворотний клапан 2 заповнює штокову порожнину 14 у гідроциліндрі 13. Під дією тиску, що виникає в поршневій порожнині 12, робочий поршень гідроциліндра 15 переміщується вліво і закріплений на ньому шток 16 рухається по заданій траєкторії, перекриваючи потік технологічного розчину в циліндричній порожнині 17. У замкненій гідравлічній системі штокова порожнина 14 гідроциліндра 13 приєднана до гідроаккумулятора 1, в якому підвищується тиск. Далі через трубопровід 11 тиск діє на плунжер 9, викликаючи переміщення двоходового золотника керування 5 вгору. Подача рідини по трубопроводу 10 в підторцеву порожнину двоходового золотника керування 5 зумовлює миттєве переміщення останнього вгору і сполучення напірної магістралі і поршневої порожнини 12 робочого гідроциліндра 13 зі зливною магістраллю 20. Двоходовий золотник керування 5 утримується у верхньому

положенні до повної розрядки акумулятора 1 і повернення робочого поршня 15 гідроциліндра 13 із закріпленим на ньому штоком 16 у вихідне положення, що призводить до відкриття циліндричної порожнини 17 та створення імпульсу потоку просочувальної композиції. Коли тиск в гідравлічній системі падає, регульована пружина 4 повертає двоходовий золотник керування 5 у вихідне положення, і починається наступний цикл.

Однак конструкції пристроїв для створення імпульсів рідини, що базуються на перекиванні-відкриванні трубопроводу з просочувальною композицією за допомогою штоку, мають кілька недоліків, які можуть бути вагомими в процесі імпрегнування матеріалів. Пристрій зі штоком зазнає значних механічних навантажень під час різкого відкривання та закривання. Це може призвести до швидкого зношування рухомих частин, що скоротить його термін служби та збільшить потребу в обслуговуванні. У таких конструкціях можуть виникати значні втрати енергії через гідравлічні удари, які виникають при різких змінах потоку, що може знижувати ефективність роботи пристрою. Перекивання трубопроводу за допомогою штоку є чутливим до забруднень у разі їх наявності у просочувальній композиції. Це може призвести до блокування або інших несправностей. Крім того, ширшого дослідження потребує питання імовірного виникнення нестабільних імпульсів тиску рідини, зумовлені різким відкриванням-закриванням штоку.

5.5 Синтез оптимального варіанту технологічного обладнання імпульсної дії для модифікації будівельних матеріалів

На підставі аналізу розроблених конструкцій установок для модифікації будівельних матеріалів шляхом імпульсного імпрегнування за об'єкт досліджень було прийнято імпульсне устаткування для імпрегнування будівельних матеріалів та виробів, в конструкції якого враховані основні ключові параметри разом характеристиками попередніх конструкцій та ліквідовані властиві їм недоліки. Принципова схема конструктивного виконання устаткування для

імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів та виробів, що захищена патентом України на корисну модель, наведено на рис. 5.8 [165].

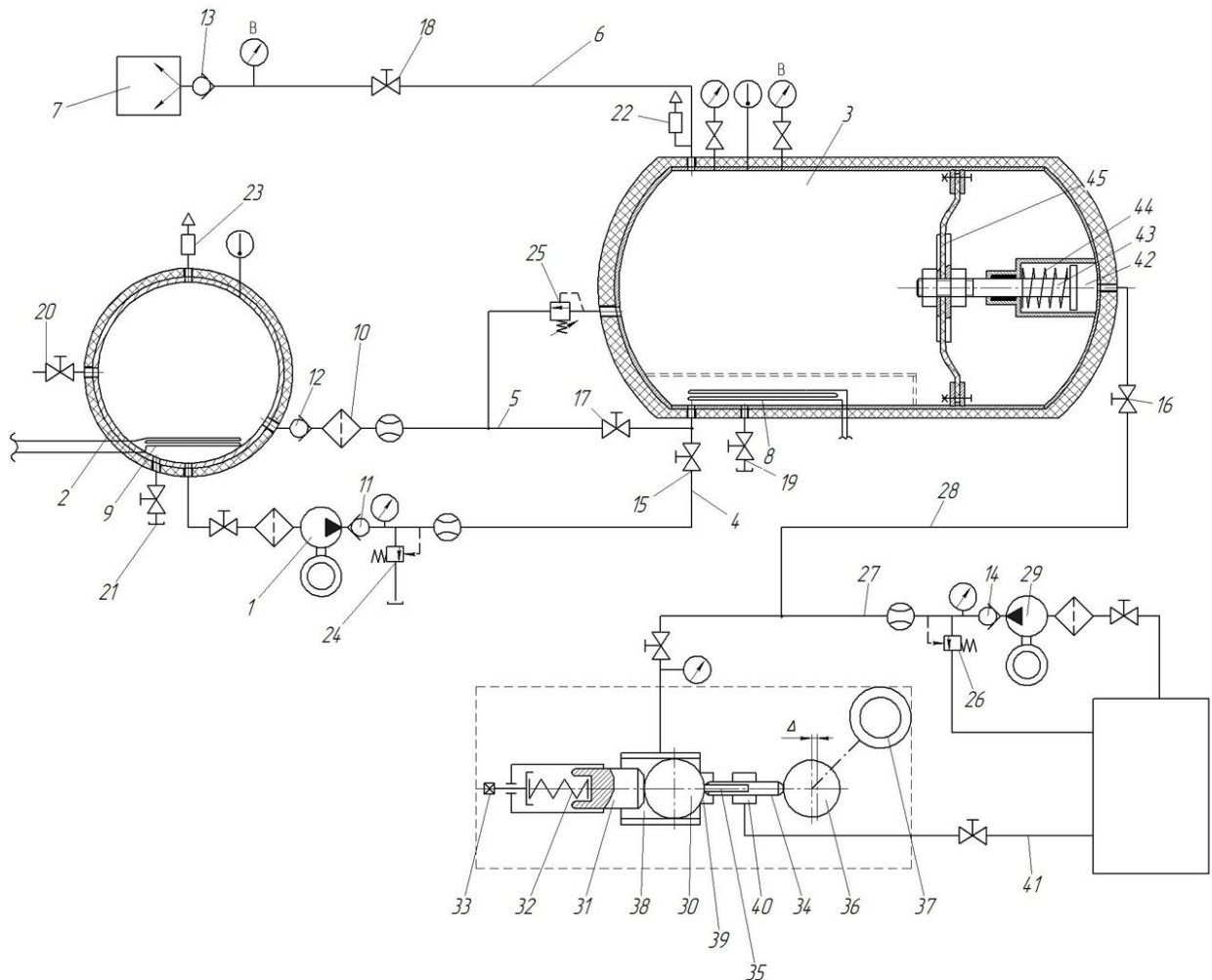


Рисунок 5.8 – Принципова схема устаткування для імпульсного гідротермічного імпрегнування будівельних матеріалів та виробів

Запропоноване устаткування [165] працює так. Після завантаження будівельних матеріалів чи виробів, які підлягають імпрегнуванню, до просочувальної камери 3 вмикається перший рідинний насос 1, який заповнює просочувальну камеру 3 просочувальною композицією із маневрової камери 2 через перший зворотний клапан 11, перший запобіжний клапан 24 та систему напірного трубопроводу 4, при відкритій першій засувці 15 і закритих третій 17, четвертій 18 засувках, а також першій 19, другій 20, третій засувках 21 для заповнення та зливу просочувальної композиції. У процесі заповнення

просочувальної камери 3, повітря що залишилось у ній видаляється через перший дихальний клапан 22. Перший рідинний насос 1, який повністю заповнив просочувальною композицією просочувальну камеру 3, встановлює у ній проєктний статичний рідинний тиск, після чого відключається. Одночасно з цим відкривається друга засувка 16 і закривається перша засувка 15. Потім вмикається другий рідинний насос 29, який подає робочу рідину через четвертий зворотний клапан 14, третій запобіжний клапан 26 із напірної магістралі 27 через гідролінію 28 в робочу порожнину 42. Під дією тиску робочої рідини в робочій порожнині 42, шток 43 виконує переміщення, стискаючи пружину 44 і передаючи зусилля на мембрану 45. Переміщення мембрани 45 зумовлює зменшення об'єму просочувальної камери 3, що призводить до зростання тиску рідини у ній до величини, яка задана проєктом. При увімкненні двигуна 37, штовхач 34, під дією ексцентрика 36, переміщує кульковий запірний елемент 30 від установочного сидла, чим перекриває зв'язок надклапанної порожнини 38 з робочою порожниною 42. В результаті цього робоча порожнина 42 через гідролінію 28, другу засувку 16, підклапанну порожнину 39, поздовжні лиски 35 штовхача 34 та кільцеву розточку 40 сполучаються зі зливною магістраллю гідравлічного розподілювача 41. В робочій порожнині 42 падає тиск, а шток 43 і мембрана 45 під дією пружини 44 різко переміщуються, витісняючи робочу рідину із робочої порожнини 42 у зливну магістраль гідравлічного розподілювача 41. Переміщення мембрани 45 у зворотний бік спричинює збільшення об'єму і падіння тиску в просочувальній камері 3. Після цього, плунжер 31 під дією зусилля притискання пружини 32, що налаштована регулювальним гвинтом 33, притискає кульковий запірний елемент 30 до установочного сидла, відсікаючи робочу порожнину 42 від зливної магістралі гідравлічного розподілювача 41. Далі цикл повторюється у автоматичному режимі до закінчення процесу імпрегнування будівельних матеріалів та виробів. Регулювання частоти обертів двигуна 37 відкриває можливість отримувати імпульси тиску рідини в просочувальній камері 3 із частотою, заданою проєктом. Робота гідравлічного розподілювача реалізує імпульсний режим зміни тиску

рідини у просочувальній камері 3, який викликає перепад тиску, спонукаючи рух просочувальної рідини в порах і капілярах будівельних матеріалів та виробів. Даний перепад тиску можна описати залежністю $\Delta p = p_k + p_{имп} - p_{втр} - p_n$, де Δp – перепад тиску рідини; p_k – капілярний тиск; $p_{имп}$ – перепад тиску, обумовлений імпульсом рідини; $p_{втр}$ – втрати тиску в капілярі (порі); p_n – тиск повітря, яке затиснуте всередині капіляра (пори). У процесі просочування будівельних виробів терморегулятор із першим трубчастим електричним нагрівачем 8 підтримує задану температуру просочувальної композиції в просочувальній камері 3. При перевищенні проектних величин тиску, відбувається скид надлишкової кількості просочувальної рідини через другий запобіжний клапан 25, що сполучений зі зливним трубопроводом 5. Після завершення процесу імпрегнування будівельних матеріалів другий рідинний насос 29 разом з двигуном 37 вимикаються. Після чого відкривається третя засувка 17 і залишок просочувальної композиції по зливному трубопроводу 5 перетікає через фільтр 10 та другий зворотний клапан 12 до маневрової камери 2, де змішується із підготовленою просочувальною композицією. В процесі змішування залишку просочувальної композиції з підготовленою просочувальною композицією залишок повітря у маневровій камері 2 видаляється через другий дихальний клапан 23, а задана температура просочувальної композиції підтримується другим трубчастим електричним нагрівачем 9. Після повного зливу залишкової кількості просочувальної композиції, третя засувка 17 перекривається одночасно з відкриттям четвертої засувки 18. Далі в роботу вмикається вакуум-насос 7, що виконує вакуумування просочувальної камери 3 через вакуумну лінію 6 і третій зворотний клапан 13. По завершенню вакуумування, вакуум-насос 7 відключається. Потім проводиться розгерметизація та видалення продукції із просочувальної камери 3.

Використання запропонованого обладнання для імпульсного гідротермічного імпрегнування будівельних матеріалів та виробів дозволяє

отримувати готову продукцію високої якості, тобто модифіковані будівельні вироби, з дотриманням усіх технологічних вимог процесу обробки.

Крім того, запропоноване устаткування є досить універсальним і відкриває можливість застосування різних технологічних рідин в ролі просочувальних композицій, а також модифікації різних типів будівельних матеріалів та виробів, що мають капілярно-пористу структуру.

Представлена установка має можливість коригування та налаштування таких параметрів: величини статичного та динамічного тисків рідини, їх частоти повторення імпульсів тиску, температури просочувальної композиції. Оснащення вказаного устаткування обладнанням для реалізації автоматизованої системи керування дозволить швидко змінювати або задавати параметри попередньо для різних комбінацій просочувальних композицій і матеріалів, які піддаються обробці.

5.6 Розрахунок техніко-економічної ефективності використання установки імпульсного просочення бетонів

Визначаючи економічну ефективність впровадження устаткування і технології імпульсного імпрегнування бетонів брали до уваги всі витрати: капітальні вкладення та експлуатаційні витрати [166].

До капітальних вкладень віднесли: вартість обладнання з урахуванням вартості його монтажу та налаштування.

До експлуатаційних витрат віднесли: витрати на оплату праці з відповідними відрахуваннями до нормативно затверджених фондів, витрати на просочувальні матеріали, витрати на електроенергію, амортизаційні відрахування .

Показник ефективності напрямку інноваційного розвитку розраховуємо за формулою [167]:

$$K_{HIP} = \frac{\sum_{i=1}^T E \cdot (1+r)^{-1}}{\sum_{i=1}^T IK \cdot (1+r)^{-1}} \quad (5.1)$$

де E – очікуваний ефект від впровадження і реалізації напрямку в t -му періоді;

IK – очікуваний інноваційний капітал для впровадження і реалізації напрямку в t -му періоді;

r – ставка дисконтування;

T – період часу від початку інноваційного циклу до кінця життєвого циклу інноваційної продукції, 3 років.

Для роботи із установкою потрібна одна людина. Визначимо річний фонд заробітної плати робітника за формулою [168]:

$$ЗП_{заг} = t_p \cdot D_p \cdot ЗП_{год} \cdot T_{заг}^p \cdot K_{II} \cdot 0,01, \quad (5.2)$$

де $ЗП_{год}$ – годинна тарифна ставка робітника, грн./год.:

$$ЗП_{год} = \frac{M_m \cdot K_i}{T_p \cdot T_{зм}}, \quad (5.3)$$

де M_m – мінімальна місячна оплата праці робітників, грн. $M_m = 8000$ грн.;

K_i – тарифний коефіцієнт робітника даного розряду;

T_p – число робочих днів в місяці;

$T_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$ЗП_{год} = \frac{8000 \cdot 1}{22 \cdot 6} = 60,6 \text{ (грн / год)},$$

K_{II} – коефіцієнт, який враховує премію, додаткову заробітну плату і виплати до соціальних фондів ($K_{II} = 1,5$).

Річний фонд заробітної плати:

$$ЗП_{ме} = 6 \cdot 256 \cdot 60,6 \cdot 1,5 \cdot 0,01 = 1396,22 \text{ (грн)}.$$

Витрати на технічне обслуговування ($V_{ТО}$) і ремонт обладнання визначаються в межах 10 відсотків від вартості установки ($K_{ОБЛ}$):

$$V_{ТО} = K_{ОБЛ} \cdot 0,1 = 61905 \text{ (грн)}. \quad (5.4)$$

$$V_{ТО} = 619050 \cdot 0,1 = 61905 \text{ (грн)}.$$

Витрати на електроенергію визначаємо за формулою [169]:

$$V_{ел} = P_{ОБЛ} \cdot D_p \cdot t_p \cdot K_{зав} \cdot B_{кл}, \quad (5.5)$$

де $P_{ОБЛ}$ – потужність установки, кВт;

D_p – кількість робочих днів на рік;

t_p – тривалість роботи зони ПР;

$K_{зав}$ – коефіцієнт завантаження електропривода;

$B_{кл}$ – вартість 1 кВт·год, грн.

Отже, витрати на електроенергію будуть складати

$$V_{ел} = 0,5 \cdot 256 \cdot 6 \cdot 0,25 \cdot 4,32 = 829,44 \text{ (грн)}.$$

Амортизаційні відрахування становлять 12% від вартості устаткування для імпульсного імпрегнування:

$$V_{ам} = 619050 \cdot 0,12 = 74286 \text{ (грн)}.$$

Загальні експлуатаційні витрати впровадження устаткування для гідроімпульсного імпрегнування:

$$E = 138416,66 \text{ грн.}$$

Економічний ефект від впровадження устаткування для гідроімпульсного імпрегнування досягається завдяки збільшенню гідрофобних властивостей або міцності виробів на стиск орієнтовно на 40%, що дозволяє виготовляти менш матеріаломісткі та більш довговічні конструкції. Вартість просочування 1 м^3 бетонних виробів планується на рівні 800 грн., тоді очікуваний прибуток складе $\Pi_0 = 432702$ грн.

Капітальні вкладення, приведені до експлуатаційних витрат через коефіцієнт ефективності 0,12 становитимуть:

$$V_{ТО} = K_{ОБЛ} \cdot 0,1 = 61905 \text{ (грн)}. \quad (5.6)$$

$$K_B = K_{ОБЛ} \cdot 0,12. \quad (5.6)$$

$$K_B = 619050 \cdot 0,12 = 74286 \text{ (грн)}.$$

Річний економічний ефект визначається за формулою

$$E_{ef} = \Pi_D - E_{EB}^P - K_B. \quad (5.7)$$

$$E_{ef} = 432702 - 138416,66 - 74286 = 219999,34 \text{ (грн)}.$$

Визначимо термін окупності впровадження технології гідроімпульсного імпрегнування за формулою [170]

$$T_{ок} = \frac{K_{ОБЛ}}{E_{ef}}, \quad (5.6)$$

де $K_{ОБЛ}$ – витрати на купівлю і монтаж установки, грн.

Тоді термін окупності становитиме

$$T_{ок} = \frac{619050}{219999,34} = 2,8 \text{ (роки)}.$$

З виконаних вище розрахунків видно, що термін окупності не перевищує рекомендованих 3 роки. Отже, впровадження устаткування для гідроімпульсного імпрегнування виправдане.

Розрахуємо рентабельність від впровадження технології

$$P_{ін} = \frac{219999,34}{619050} \cdot 100 = 35\%$$

Показник ефективності напрямку інноваційного розвитку розраховано для 3 років:

$$K_{np} = \frac{432702 \cdot 3 \cdot 0,88}{619050 \cdot 0,88 + 138416,66 \cdot 3 \cdot 0,88} = 1,25.$$

Напрямок інноваційного розвитку економічно доцільний.

5.7 Висновки до розділу 5

На підставі аналізу відомих методів модифікування будівельних матеріалів шляхом імпрегнування у розділі 1 було визначено найбільш ефективний та

перспективний метод імпрегнування будівельних матеріалів, а саме просочування із застосуванням тиску, зокрема обробка будівельних матеріалів та виробів методом імпульсного імпрегнування.

Запропоновано нову ефективну технологію модифікації будівельних виробів із бетону шляхом імпульсного імпрегнування просочувальними композиціями. В основу запропонованого способу обробки капілярно-пористих матеріалів покладено використання імпульсного силового впливу, який забезпечує глибоке надходження просочувальних композицій у структуру матеріалів за рахунок створення і чергування імпульсів тиску просочувальної композиції. Це дозволяє збільшити глибину проникнення та рівномірність заповнення об'єму будівельних виробів з бетону, що сприяє підвищенню фізико-механічних характеристик бетону. Залежно від типу просочувального складу це можуть бути зниження водопоглинання, що призводить до збільшення морозостійкості, підвищення міцнісних характеристик бетону, зменшення проникності виробу, що в результаті справляє позитивний ефект на збільшення довговічності та поліпшує експлуатаційні характеристики будівельних виробів із бетону.

На підставі аналітичного огляду існуючих конструкцій обладнання для імпрегнування будівельних матеріалів під тиском було виконано і запропоновано нові конструкції прототипів устаткування для імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів, яке реалізовує запропоновану технологію модифікування. Устаткування містить видозмінену просочувальну камеру, у порівнянні з відомими аналогами, а також є оснащеним додатковим обладнанням для генерації імпульсів тиску рідини.

У ході розробки запропонованої установки було запропоновано декілька варіантів конструктивного виконання пристроїв для генерації імпульсів тиску рідини, робота яких включає перекидання-відкривання трубопроводу з просочувальним складом. В результаті аналізу та досліджень було визначено їхні недоліки, які можуть впливати на якість роботи устаткування для імпрегнування та його експлуатаційні характеристики. Ключовими з яких є виникнення значних

механічних навантажень на рухомі елементи гідроімпульсного пристрою, що може призвести до зменшення терміну експлуатації обладнання, а також нестабільних імпульсів тиску рідини, зумовлені різким відкриванням-закриванням штоку. Враховуючи виявлені недоліки, в НДЛ Гідродинаміки було розроблено принципову схему конструктивного виконання обладнання для імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів та виробів, оснащеного генератором імпульсів тиску, який представлений у вигляді гідравлічного розподільвача, просочувальної камери з встановленою мембраною, що передає імпульси тиску від робочої рідини до просочувальної композиції, системою підігріву та іншими компонентами.

У запропонованому устаткуванні, що реалізує технологію імпульсного імпрегнування будівельних виробів із бетону, передбачена можливість регулювання частоти повторюваності імпульсів тиску, величини імпульсів тиску рідини, а також температури просочувальної композиції.

Проведене оцінювання економічної ефективності створення технології імпульсного імпрегнування будівельних виробів з бетону. Показник ефективності напрямку інноваційного розвитку на розрахунковий період реалізації проєкту, який приймали 3 роки склав 1,25, рентабельність проєкту 35%, а період окупності – 2,8 років. Зважаючи на економічні показники можна зробити висновок про прибутковість впровадження технології імпрегнування. Отже, створення технології гідроімпульсного просочування будівельних матеріалів є доцільним і економічно ефективним.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну проблему покращення фізико-механічних властивостей будівельних виробів із бетону з використанням технології та устаткування для імпульсного імпрегнування. Відповідно до поставлених завдань і наукової новизни одержаних результатів дисертаційного дослідження сформульовано такі висновки.

1. Виконано аналітичний огляд відомих методів модифікації будівельних матеріалів капілярно-пористої будови. Зокрема визначено основні технологічні операції, переваги та недоліки існуючих методів імпрегнування. Визначено поширені та ефективні технології для покращення фізико-механічних властивостей будівельних виробів, а саме метод вакуум-тиск-вакуум, а також тиск-тиск-вакуум, тиск-атмосферне повітря-вакуум. У результаті літературного огляду визначено найбільш перспективний напрямок модифікації будівельних виробів із бетону шляхом імпрегнування, який полягає у використанні імпульсів тиску просочувальної композиції.

2. Проаналізовано відоме устаткування для реалізації методів імпрегнування будівельних матеріалів та виробів. Досліджено різні принципові та конструктивні схеми апаратів, що застосовуються для реалізації методів імпрегнування із застосуванням тиску. Проведено узагальнення основних комплектуючих відомих імпрегнаторів, що стало підґрунтям для формування структурної схеми обладнання для імпрегнування будівельних виробів із бетону.

3. Проведено математичне моделювання процесів проникнення просочувальних композицій в капілярно-пористу структуру бетону, що протікають під час імпульсного імпрегнування, на основі якого встановлено основні параметри, які впливають на процес імпульсного імпрегнування бетону, в тому числі статичну та динамічну складові повного тиску просочувального складу. Отримано рівняння для капіляра або розімкнутої пори, а також для замкнутої пори із затиснутим залишковим повітрям всередині, що відображають різницю тисків, спричинену застосуванням імпульсів тиску, яка зумовлює рух

просочувальної композиції в об'єм бетонного зразка. Виявлено зв'язок між втратами тиску в капілярі на подолання сил опору, капілярним тиском і ударним тиском рідини. Виконано математичне моделювання оцінювання технічного стану обладнання для імпульсного імпрегнування будівельних виробів із бетону у процесі його експлуатації в результаті якого побудовано поверхні функцій належності, які відображають залежність технічного стану устаткування для імпульсного імпрегнування виробів із бетону від параметрів процесу імпрегнування і можуть сприяти виявленню та діагностиці причини відхилень фактичних характеристик, які можуть виникати під час експлуатації обладнання.

4. Експериментальним шляхом визначено вплив різних просочувальних композицій на фізико-механічні властивості будівельних виробів із бетону модифікованого способом імпульсного імпрегнування. В результаті застосування імпульсного способу імпрегнування дослідних зразків розчином метилсиліконату калію знизилося водопоглинання бетону до 1,36%, при наскрізному проникненні просочувального складу. Водопоглинання необроблених контрольних зразків 7,12%. Показник водопоглинання бетону, просоченого відомим способом вакуум-тиск-вакуум становить 3,14%, при глибині проникнення просочувального складу до 8 мм. У випадку застосування імпульсів тиску рідини збільшилася проникність рідкого натрієвого скла та ступінь заповнення об'єму дослідних зразків. Зафіксований приріст маси при застосуванні імпульсного імпрегнування 8,39%, у випадку застосуванні імпрегнування відомим способом вакуум-тиск-вакуум становив 5,13%. Ступінь міцності бетону, просоченого рідким натрієвим склом імпульсним способом, збільшився на 18,2% на стиск та на 34% при випробуваннях на згин у порівнянні з методом вакуум-тиск-вакуум.

5. Розроблено нову енергоефективну технологію для модифікації будівельних матеріалів шляхом імпульсного імпрегнування, яка полягає у використанні впливу імпульсів тиску просочувальної композиції, що інтенсифікує та покращує процес проникнення просочувальних композицій у

структуру бетону внаслідок створення і чергування імпульсів тиску просочувальної композиції. Це дозволяє збільшити глибину проникнення та рівномірність розподілення просочувальної композиції по об'єму будівельних виробів з бетону. Це сприяє підвищенню фізико-механічних характеристик бетону та зменшення тривалості його обробки.

б. Розроблено принципові та конструктивні схеми прототипів установок для імпрегнування будівельних виробів із бетону. Проаналізовано недоліки які можуть впливати на якість роботи устаткування для імпрегнування та його експлуатаційні характеристики, основними з яких є виникнення значних механічних навантажень на рухомі елементи гідроімпульсного пристрою, що, а також нестабільних імпульсів тиску рідини. Враховуючи виявлені недоліки, в було розроблено принципову схему конструктивного виконання обладнання для імпульсного імпрегнування будівельних матеріалів та виробів, оснащеного генератором імпульсів тиску, який представлений у вигляді гідравлічного розподілювача, просочувальної камери з встановленою мембраною, що передає імпульси тиску від робочої рідини до просочувальної композиції, системою підігріву та іншими компонентами.

Результати дисертаційних досліджень впроваджено у навчальний процес підготовки бакалаврів Вінницького національного технічного університету, які навчаються за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія», у практичну діяльність Товариства з обмеженою відповідальністю «ВІННИЦЯБУД», у практичну діяльність Товариства з обмеженою відповідальністю «Грань», а також у практичну діяльність Хмельницької філії Державного підприємства Державного науково-дослідного та проектно-вишукувального інституту «НДПРОЕКТРЕКОНСТРУКЦІЯ», що підтверджується відповідними актами впровадження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Проектування складів бетонів: монографія. Рівне : НУВГП, 2015. 353 с.
- [2] Aili A., Maruyama I. Review of several experimental methods for characterization of micro- and nano-scale pores in cement-based material. International journal of concrete structures and materials. 2020. Vol. 14, № 15 November 2020. 55. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00431-y>.
- [3] Guan, D.; Pan, T.; Guo, R.; Wei, Y.; Qi, R.; Fu, C.; Zhang, Z.; Zhu, Y. Fractal and multifractal analysis of microscopic pore structure of UHPC matrix modified with nano silica. Fractal fractional. 2024. Vol. 8. 360. DOI: <https://doi.org/10.3390/fractalfract8060360>.
- [4] Zhi-Lu Jiang, Ying-Jie Pan, Jian-Fan Lu, Yao-Cheng Wang. Pore structure characterization of cement paste by different experimental methods and its influence on permeability evaluation . Cement and concrete research. 2020. Vol. 159, 106912. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106892>.
- [5] Менайлюк О. І., Бабій І. М., Бочорішвілі Г. Д., Бочевар К.І. Матеріали та технології ізоляційних робіт в будівництві. : монографія. Одеса: ФОП Бондаренко М.О., 2020. 497 с.
- [6] Пшінько О.М., Краснюк А. В., Громова А. В., Щербак А. С. Ефективний теплоізоляційний матеріал з відходів скляної промисловості. Мости і тунелі: теорія, досліді, практика. 2012. № 2. С. 67–70.
- [7] Очеретний В. П., Ковальський В. П., Машницький М. П., Бондар А. В. Залежність теплотехнічних та фізико-механічних властивостей ніздрюватих бетонів від параметрів виготовлення. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2009. № 2. С. 34–39.
- [8] Шишкін О., Піскун І. Регулювання пористості дрібнозернистого бетону виготовленого на шлакопортландцементі. Науковий вісник будівництва. 2024. № 110. С. 88–95. DOI: <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2024.110.1.13>

- [9] Leitao Cao, Qiuxia Fu, Yang Si, Bin Ding, Jianyong Yu .Porous materials for sound absorption. Composites communications. 2018. Vol. 10. P. 25–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2018.05.001>.
- [10] Дворкін Л. Й. Архітектурне матеріалознавство : Рівне : НУВГП, 2022. 560 с.
- [11] Коверніченко Л. Структура штучних будівельних матеріалів і її особливості. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2019. № 11. С. 38–43. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2019-1\(11\)-05](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2019-1(11)-05).
- [12] Криль Я. А., Флюнт О. Р., Криль Г. В. Матеріалознавство. Тлумачний словник / ред. Я. А. Криля. Львів : Новий Світ – 2000, 2020. Т. 1. 432 с.
- [13] Gagg, Colin R. Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. Engineering Failure Analysis. 2014. Vol.40. P.114–140. DOI:[10.1016/j.engfailanal.2014.02.004](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004).
- [14] Barabash I.V., Babiy I.N., Streltsov K.O. Intensive separate technology and its influence on the properties of cement-water compositions, solutions and concretes on their basis. Сучасне будівництво та архітектура. 2022. №. 2, С. 44–51. DOI: <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2022-2-44-51>
- [15] Crow J. M. The concrete conundrum. Chemistry World. 2008. P. 62–66.
- [16] Баженов Ю.М. Сучасна технологія бетону. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. 2010. №36. С. 10-17.
- [17] Пісчанська В. В., Войтюк Г. С., Пітак Я. М. Вплив модифікатору на твердіння цементного каменю і властивості вогнетривкого бетону. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2014. Т. 3, №. 6, С. 51-57.
- [18] Панасюк В. А., Вировой В. М., Сільченко С. В. Аналіз зміни властивостей мікроструктури бетону у часі. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2011. № 22. С.120-124.
- [19] Бондар А. В., Дудар І. Н., Мороз Д. В. Дослідження впливу полімерних добавок на властивості поризованих сухих будівельних

сумішей. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві, том 31, № 2, С. 12-18. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-2-12-18>

[20] Meiyu Shao, Andrii Bieliatynskiy, Viacheslav V. Trachevskiy, Shilin Yang. Multifunctional composites with a polymer matrix containing carbon nanotubes: a study of structural, physicochemical and operational characteristics. Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2024. Vol 24. DOI: <https://doi.org/10.1080/1536383X.2024.2389180>

[21] Гамеляк, І. П., Карафізі, Л. М. Проблеми і перспективи влаштування покриттів із блоків мощення. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2011. №80. С.23-33.

[22] Balakrishna M. N. Fundamental characterisation of impregnation on concrete structures: Doctoral dissertation / Nottingham Trent University. Nottingham, UK, 2017. 406 p.

[23] Златковський О. А. Особливості льодоутворення при заморожуванні цементного каменю в бетоні : дис... канд. техн. наук : 22.03.01 / Харківський державний технічний ун-т. Будівництва та архітектури. Харків, 2001. 235 с.

[24] Горюн О. О., Коц І. В. Аналітичний огляд недоліків існуючих цементобетонних аеродромних покриттів : тези доп. всеукр. наук.-техн. конф. (м. Вінниця, 13- 15 лист. 2018 р.). Вінниця, 2018. С. 33–36.

[25] Горюн О. О., Коц І. В. Аналітичне дослідження стану існуючих асфальто- та цементобетонних аеродромних покриттів. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництв. 2019. № 1. С. 38–42. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-1-38-42>.

[26] Гамеляк І.П., Райковський В.Ф. Забезпечення надійності дорожніх одягів при ремонті та реконструкції існуючих цементобетонних покриттів, зруйнованих віброрезонансним методом на слабких основах. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, том 2, № 92, С. 17-23. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.2.17>.

[27] Сердюк В. Р., Ковальський В. П. Оцінка усадки теплоізоляційного автоклавного газобетону : матеріали міжнарод. наук.-техн. конф.

Структурування та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій (м. Одеса, 23 квітня 2024). Одеса, 2024. С. 129–135.

[28] Md Azree, Othuman. Mechanical properties of foamed concrete exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 26. P. 638–654. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.067>.

[29] Соломка В. І. Хімічна та біологічна корозія бетону і її наслідки для залізобетонних конструкцій мостів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2013. № 4. С. 107–112.

[30] Maryoto A. Improving microstructures of concrete using Ca(C18H35O2)2. *Procedia Engineering*. 2015. Vol.125. P. 631 – 637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.086>.

[31] Рудченко Д. Г., Сердюк В. Р. Мінеральні добавки в технології виробництва автоклавного газобетону. зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2022. № 199. С. 32–43. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.199.2022.258670>.

[32] Сердюк В. Р., Христинч О. В., Лемішев М. С. Проблеми стабільності формування макроструктури ніздрюватих газобетонів безавтоклавного твердіння. *Будівельні матеріали, виробни та санітарна техніка*. 2011. № 40. С. 166-170.

[33] Горніковська І. Б., Каганов В. О. Тріщиностійкість пінобетонів для дорожнього будівництва. *Ресурсоеконом. матеріали, конструкції, будівлі та споруди* : зб. наук. праць. 2015. № 31. С. 305-312.

[34] Балашова Ю. Б., Дем'яненко В. В., Трегуб О. В., Чепурна К. О., Балашов А. О. Застосування інноваційних технологій у будівництві покриттів автомобільних доріг. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. №3. С. 19-32. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.19.1056>.

[35] Бабій І. М., Галушко В. А., Колодяжна І. В. Підбір оптимальних складів та режимів ТВО бетонів на активованому портландцементі для дорожніх покриттів. *Вісник ОДАБА*. 2015. №58.

[36] Палій О.В. Екологічні аспекти утилізації відходів руйнувань в Україні: використання переробленого матеріалу для сталого будівництва. Екологічні науки. 2024. №1. Том 2. С. 84-88. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.12>.

[37] Палій О.В. Підвищення екологічної безпеки за рахунок впровадження рециклінгу відходів руйнації у виробництво бетону : дис. ... д-ра. філос. : 101.10. Житомир, 2024. 256 с.

[38] Березюк, О. В., Лемешев, М. С., Стаднійчук, М. Ю. Поширеність переробки золи при виготовленні будівельних матеріалів. Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві. 2023. № 2. С. 56-61. DOI <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-2-56-61>.

[39] Ковальський В.П., Тимошенко В. О. Дослідження перспективи використання золи виносу в будівництві. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2023. № 1. С. 36–42. DOI <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-1-36-42>.

[40] Лемешев М. С., Христинч, О. В., Зузяк, С. Ю. Ресурсозберігаюча технологія виробництва будівельних матеріалів з використанням техногенних відходів. Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві. 2018. № 1. С. 18-23.

[41] Guanghong L., Xiao L., Shiyu L., Yurui X., Yunsheng Z., Jianan G., Rui jun G., Zhongyuan W., Ziming W., Suping C. Development of chemical admixtures fo rgreen and environmentally friendly concrete: A review. Journal of Cleaner Production. 2023. Vol.389. 136116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136116>.

[42] Дерев'янюк В. М., Гришко Г. М., Ватажишин О. В. Оцінка ефективності впливу ультра- та нанодисперсних добавок для модифікації сульфатних і сульфоалюмінатних фаз. Український журнал будівництва та архітектури. 2023. №4. С. 71-76. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.290823.71.972>.

[43] Барабаш І. В., Ксьоншкевич Л. М. Вплив механоактивації на міцність дисперсноармованого бетону з добавкою золи-виносу : тези доп. 76-ї наук. – техн. конф. професорсько – викладацького складу академії (м. Одеса, 25 - 29 травня 2020). Одеса, 2020. С. 10.

[44] Шишкіна О.О. Особливості фізико-механічних властивостей модифікованого бетону на основі композиційного цементу. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. Луцьк, ЛНТУ. 2024, №21. С. 296-302. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11\(21\)-31](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-31).

[45] Коц І. В., Колісник О. П. Тепловологісна обробка бетонних виробів з використанням аеродинамічного нагрівання : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2013. 100 с.

[46] Колісник О. П., Коц І. В. Використання аеродинамічного нагрівання при тепловологісній обробці бетонних дорожніх конструкцій. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво : наук.-техн. зб. м. Київ, 2013. № 90. С. 80-88.

[47] Дехта Т. М., Громова О. В., Василенко С. В. Збереження енергоресурсів під час термічної обробки бетону за рахунок використання добавок. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. 2024. № 25. С. 46–52. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2024/303292>.

[48] Кугаєвська Т.С. Прискорення твердіння плиток бетонних тротуарних без використання теплоносія. Науковий вісник будівництва. 2017. Т. 9, № 3. С.172-176.

[49] Дворкін Л. Й., Житковський В. В., Марчук В. В., Степасюк Ю. О., Скрипник М. М. Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної сировини : монографія. Рівне : НУВГП, 2017. 424 с.

[50] Гарнага В. Л., Дудар І. Н. Хіміко-термосилова технологія дрібнорозмірних бетонних виробів : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2013. 104 с.

[51] Long W., Liu J., Zheng Sh., He Ch. A novel ultrasonic method to exfoliate CLDH toward improving mechanical and chloride binding properties of cementitious composites. Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 441. 140990. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140990>

[52] Xiong G., Ren Y., Jia X., Fang Z., Sun K., Huang Q., Wang Ch., Zhou Sh. Understanding the influence of ultrasonic power on the hydration of cement paste. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 87. 108996. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108996>

[53] Горюн О. О. Напрямки вдосконалення технологій виготовлення будівельних виробів на основі полімерного бетону для аеродромних покриттів : тези доп. XLVIII наук.-техн. конф. підрозділів Вінницького національного технічного університету «НТКП ВНТУ–2019», (м. Вінниця, 27 бер. 2019). Вінниця, 2019. С. 10.

[54] How to improve salt insulation of reinforced concrete.: patent JP7090533B2 Japanese. № 2018-223732; date of filing: 29.11.2018; Date of publication: 04.06.2020, 10 p.

[55] Hatice G. Ş., Ali M., Süleyman Ö., Ayvaz E.. Utilization of high-range water reducing admixture having air-entraining agents in cementitious systems. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 64. 105565. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105565>.

[56] Ślosarczyk A., Klapiszewska I., Skowrońska D., Janczarek M., Jesionowski T., Klapiszewski L. A comprehensive review of building materials modified with metal and metal oxide nanoparticles against microbial multiplication and growth. *Chemical Engineering Journal*. 2023. Vol. 466. 143276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143276>.

[57] Коваленко О. В. Технологічні напрями підвищення експлуатаційної надійності та довговічності гідротехнічних споруд при їх ремонті та реконструкції. *Меліорація і водне господарство*. 2014. №101. С. 332-340.

[58] Ілів В. В., Котів М. В. Отримання пінобетонів з пониженим водопоглинанням та підвищеною водостійкістю. *Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка"*. 2008. № 627. С. 112-115

[59] Процес ремонтного захисту поверхні бетонних конструкцій: пат. 25225 Україна. № 200704485; заявл. 23.04.2007; опубл. 25.07.2007, Бюл. № 11. 7 с.

[60] Пушкарьова К. К., Савченко К. В. Дослідження механізму просочення бетону гідроізоляційними розчинами проникної дії. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. 2017. № 169. С. 95 - 103.

[61] Varabash I.V., Vorokhaiev A.I., Ksonshkevych L.M. Hydrophobazation of basalt fiber and its influence on the mechanical characteristics of sand concrete. Вісник ОДАБА. 2020. № 81. Р. 114-120. DOI: <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2020-81-114-120>.

[62] Method of impregnating concrete : US4091148A United States; 1995-05-23. 7 p.

[63] Khrystych O.V. Effect of deicing agents on the low-temperature performance of asphalt concrete under freeze-thaw cycling conditions. Modern technologies and methods of calculations in construction. 2023. vol 20, P. 171-176. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-10\(20\)-18](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2023-10(20)-18)

[64] Okere C.E., Nwankwo E.I., Arinze, B.C., Osukalu E.J. Waterproof Concrete Additives and Their Effects on Concrete Properties. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology. 2017. Vol. 4. P. 7621 – 7623.

[65] Muhammad N., Keyvanfar A., Majid M. Z. A., Shafaghat A., Mirza J. Waterproof performance of concrete: A critical review on implemented approaches. Construction and Building Materials. 2015. Vol. 101. P. 80 – 90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.048>.

[66] Cohen, N., Dotan, A., Dodiuk, H., Kenig, S. Superhydrophobic coatings and their durability. materials and manufacturing processes. 2015. Vol. 31(9), p. 1143–1155. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1090600>.

[67] Sidhu J., Kumar P. Comprehensive review on hydrophobic modification of concrete: progress and perspectives. Advances in Civil and Architectural Engineering. 2023. Vol. 14, № 26. P.155-180. DOI: <https://doi.org/10.13167/2023.26.10>.

[68] Колосова О.П., Ванін В.В., Колосов О.Є., Сівецький В.І. Ультразвукова обробка технологічної сировини полімерних композиційних матеріалів: навч. посіб. Київ : КПІ імені Ігоря Сікорського, 2017. 188 с.

[69] Луговський О. Ф., Гришко І. А., Зілінський А. І., Шульга А. В., Мовчанюк А. В., Берник І. М. Ультразвукові кавітаційні технології. Знезараження та фільтрування: монографія. Вінниця: ФОП Кушнір Ю.В, 2022. 268 с.

[70] Yang H., Gao M., Wang J., Mu H., Qi H. Fast Preparation of high-performance wood materials assisted by ultrasonic and vacuum impregnation. *Forests*. 2021. Vol. 12, 567. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12050567>.

[71] Вітковський Ю. А. Відновлення бетону методом поверхневого просочування полімерними композиціями із застосуванням ультразвукових коливань. *Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка*. 2012. № 43. С. 181-184.

[72] Shanaz H. A., Awham M. H., Khalida F. Improvement of porosity of mortar using polyethylene glycol pre-polymer-impregnated mortar. *Open Engineering*. 2024. Vol. 14. 20220540. DOI: <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0540>

[73] Ahmed S. H., Hameed A. M., Al-Azaw Kh. F. Polymer-impregnated cement mortar: Effects of PEG, PAM, and PVA on mechanical properties. *Journal of Applied Sciences and Nanotechnology*. 2024. Vol. 4. №. 1. P. 66-76. DOI: <https://doi.org/10.53293/jasn.2024.7089.1241>.

[74] Плохута Р. О. Аналіз технологій ремонту тріщин залізобетонних конструкцій. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2018. №35. С. 144-151.

[75] Кучеренко О. А., Кучеренко Р. О. Миргород О. В. Про механізм гідрофобізації бетону. *Вісник ОДАБА*. 2011. № 35.

[76] Кугаєвська Т.С. Комбіновані способи геліотермообробки бетонних виробів : монографія. Полтава: ПолтНТУ, 2017. 308 с.

[77] Кожушко В. П., Пронічкіна А. А. Сучасні гідроізоляційні технології. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2012. №5. С. 30-32.

[78] Коц І., В., Горюн О. О. Існуючі уявлення щодо механізму насичення будівельних матеріалів спеціальними речовинами : тези доп. Всеукраїнської наук.-техн. Унтернет-конф. «Молодь в науці: дослідження, проблеми,

перспективи (МН-2018)». (м. Вінниця, 6 черв. 2018 р.). Вінниця, 2018. С. 169-172.

[79] Веселівський Р. Б., Смоляк Д. В. Способи вогнезахисту металевих будівельних конструкцій. Fire Safety. 2021. № 39. С. 63-76. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.39.2021.08>.

[80] Дворкін Л. Й., Міцність бетону: навч. посіб. Київ : Видавничий дім «Кондор», 2021. 310 с.

[81] Yaris V., Ved V., Zybaylo S., Chaban O., Karpenko V. Research of stability of geometric parameters of wood under the moisture action. Industrial and technology systems: reports on research projects. 2020. № 3/1. P. 32 – 35. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.206335>

[82] Process for the thorough impregnation of moist pine or spruce wood. Deutes patent und Markenamt. DE 102004020729 B4. date of filing: 27.04.2004; Date of publication: 18.11.2004, 15 p.

[83] Спосіб просочення капілярно-порозного матеріалу: пат. 67662 Україна. №2003119900; заявл. 04.11.2003; опубл. 15.06.2004, бюл. № 6, 5 с.

[84] Спосіб гідроізоляції виробів з пористих матеріалів: пат. 30952 Україна. № u200708021; заявл. 16.07.2007; опубл. 25.03.2008. 5 с.

[85] Перетятко Б. М. Технологічні схеми автоклавного просочення. Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва. 2019. № 912. С. 139-145.

[86] Горюн О. О. Аналітичний огляд сучасних технологій виготовлення бетонополімерних виробів : тези доп. XIII International scientific and practical Conference "Scientific horizons", Sheffield, UK. September 30-October 7, 2018. Sheffield, 2018. P. 46-49.

[87] K. Matziaris, M. Stefanidou, G. Karagiannis. Impregnation and superhydrophobicity of coated porous low-firedclay building materials. Progressin Organic Coatings. 2011. Vol. 72. P. 181-192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.03.012>.

[88] Improved Method of Polymer Impregnation Process for Stones by Using Surface Treatment Agent : patent KR101088361B1 Koran. № 10-2009-0025727; date of filing: 26.03.2009; Date of publication: 06.10.2010, 9 p.

[89] Gauss C., Kadivar M., Savastano F. Jr. Efect of disodium octaborate tetrahydrate on the mechanical properties of *Dendrocalamus asper* bamboo treated by vacuum/pressure method. *Journal of Wood Science*. 2019. Vol. 65. 27. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10086-019-1804-6>.

[90] Малащук, Н. С., Романчук, Б. В., Колосов, О. Є., Сівецький, В. І. Інноваційні технології виготовлення модифікованих полімерних композиційних матеріалів. *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2016. №1, С. 33–38. DOI: <https://doi.org/10.20535/2306-1626.1.2016.77897>

[91] Лучко Й. Й., Гайда О. М., Пенцак А. Я. Особливості впливу технологічних чинників на процеси полімеризації просоченого бетону. *Будівництво. Металознавство*. Серія: Створення високотехнологічних екокомплексів в Україні на основі концепції збалансованого розвитку. 2017. № 99. С. 113-119.

[92] Коц І., В., Горюн О. О. Аналітичний огляд та проблематика сучасних технологій виготовлення бетонополімерів : тези доп. XLVII Всеукраїнській наук.-техн. конф. факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання. (м. Вінниця, 14-23 бер. 2018 р.). Вінниця, 2018. С. 2244-2247.

[93] Starck M., Heidel A., Brischke C., Militz H. Incising and double impregnation of beech sleepers — investigation of an alternative preservation system for wooden railway sleepers. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2022. Vol. 5. 814049. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.814049>

[94] Method for impregnating wooden tracks or wooden tracks: European patent application AT408084B. № 9043/98; date of filing: 11.04.1998; Date of publication: 15.01.2001, 6 p.

[95] Shumakov I., Miroshnikov V., Younis B., Buhaievskiy S., Bratishko S. Improvement of concrete parameters by the method of Sodium Silicates impregnation

by internal vacuum tamping : IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2024. 012031. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012031>.

[96] Токарев М.Н., Кротова О.М. Підвищення густини та міцності бетону та залізобетону просочуванням рідким склом шляхом внутрішнього вакуумування : наук. техн. збірн. Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. 2010. № 38. С.48-53.

[97] Цібеленко П. П. Деформативність бетонних елементів, просочених сіркою. Вісн. нац. ун. Львівська політехніка. 2011. С. 238-243.

[98] Камських О. В. Обґрунтування технологічної схеми обробки виробів із природного каменю з метою підвищення його довговічності. Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. 2012. № 6. С. 59-62.

[99] Горюн О. О. Дослідження процесів імпульсного насичення просочуваним розчином капілярно-пористих матеріалів : тези доп. XLV Всеукр. наук.-техн. конф. підрозділів Вінницького національного технічного університету. (м. Вінниця, 2-11 берез. 2016 р.). Вінниця, 2016. С. 1517-1518.

[100] Gameliak, I., Dmytrychenko, A., Tsybulskyi, V., Kharchenko, A., & Hustieliev O. Research of strength and condition of cement-concrete pavement on bridges by non-destructive methods. Strength of Materials and Theory of Structures. 2022. No. 108, P. 243-254. DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.243-254>.

[101] Vacuum hydraulic immersion system and dipping method. patent CN106881237B China. № 201510940469 .8; date of filing: 16.12.2015; date of publication : 23.06.2017, 8 p.

[102] Method for pressure impregnation wood or wood products with wood preservative containing vegetable oil and impregnated wood: patent CA 650951 C Canada. № 2007/000132; date of filing: 16.05.2007; date of publication: 30.10.2008, 2 p.

[103] Damay J., Fredon E., Gérardin Ph., Lemmens Ph. Evaluation of axial impregnation as an alternative to classical wood vacuum pressure impregnation

method. Maderas. Ciencia y tecnología. 2015. Vol. 17. P. 883 – 892. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000077>.

[104] Горюн О. О. Устаткування комбінованої вакуумної та гідроімпульсної силової взаємодії з м'ясною сировиною при її масажуванні та насиченні рідкими інгредієнтами: тези доп. Всеукр. наук.-практ. інтерн.-конф. «Інноваційні технології виробництва та переробки тваринницької продукції» (м. Вінниця, 25-26 жовтня 2018 р.). Вінниця, 2018. С. 322-324.

[105] Горюн О. О. Варіанти устаткування для імпульсного насичення будівельних виробів : тези доп. XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ (м. Вінниця, 27-28 квіт. 2020 р.). Вінниця, 2020. С. 2200-2224.

[106] Аерозольний розпилювач: пат. 76430 Україна: МПК2006 B05B 7/24. № 2003032640; заявл. 28.09.2001; опубл. 01.08.2006, Бюл. № 8. 16 с.

[107] Proceeding for impregnation of sheet of stones and a device to accomplish told proceeding: patent US 2016/006772 A1 United States. № 14/785,713; date of filed: 22.04.2014; date of publication: 20.10.2015, 2 p.

[108] Перетятко Б. М. Особливості технологічного процесу вогнезахисту деревини. Науковий вісник НЛТУ України. 2011. №21. 15. С. 140 - 146.

[109] Установа для поверхневого просочування залізобетонних конструкцій : пат. 72514 Україна. № 201115423; заявл. 26.12.2011; 27.08.2012, Бюл.№ 16, 4 с.

[110] Близнюк О. В. Технології одержання виробів із полімерів. Харків.: ФОП Панов А.М., 2023. – 258 с.

[111] Колосов, О.Є., Сівецький В.І., Панов Є.М., Мікульонок І.О. Математичне моделювання базових процесів виготовлення полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвукової модифікації. Київ. ВД «Едельвейс». 2012. 268 с.

[112] Коц І. В. Горюн О. О. Дослідження режимів гідроімпульсного просочення спеціальними розчинами капілярно- пористих матеріалів в автоклавах : тези доп. Міжнарод. наук.-практ. конф. «Інноваційні технології в будівництві». (м. Вінниця, 18-20 лист. 2016 р.). Вінниця, 2016. С. 111-112.

[113] Горюн О.О. Гідроімпульсне устаткування для інтенсифікації процесів масажування і насичення інгредієнтами м'ясної сировини : тези доп. Міжнародної наук.-технічн. конференції «Проблеми та перспективи розвитку тваринництва та харчової галузі». (м. Вінниця, 26 квітня 2018 р.). Вінниця. 2018. С. 540.

[114] Facility, method and impregnating medium for treating renewable raw materials and cellulose ligated plants: European patent application EP1862278A. № 07010785.9; date of filing: 31.05.2007; Date of publication: 05.12.2007 Patentblatt 2007/49, 11 p.

[115] Schober G., Porosity in autoclaved aerated concrete (AAC): A review on pore structure, types of porosity, measurement methods and effects of porosity on properties. Cement Wapno Beton. 2011. № 16.P. 39-43.

[116] Коц І. В., Горюн О.О. Устаткування для імпульсного насичення спеціальними рідинами органічних будівельних матеріалів та виробів : тези доп. Міжнародної наук.-технічн. конференції «Енергоефективність в галузях економіки України». (м. Вінниця, 11-13 лист. 2017 р.) Вінниця, 2017. С. 2055-2057.

[117] T. Centea, P. Hubert. Measuring the impregnation of an out-of-autoclave prepreg by micro-CT. Composites Science and Technology. Vol. 71. 5. P. 593-599 DOI : <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.12.009>

[118] Method for consolidating slabs of stone material : European patent application EP 2 228 185 A2. № 10156432.6; date of filing: 12.03.2010; Date of publication: 15.09.2010 Bulletin 2010/37, 8 p.

[119] Ahmed S., Awham M. Hameed, Khalida F, Al-Azaw. Improvement of porosity of mortar using polyethylene glycol pre-polymer-impregnated mortar. Open Engineering. 2023. Vol. 14. 20220540. DOI: <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0540>.

[120] V. Kovalskiy, G. Mingjun. The influence of deicing salt on air voids of asphalt mixture under freeze-thaw cycle. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2023. том 34, №. 1, С. 43-50. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-1-43-50>

[121] Shevchenko A.O. Effect of impregnating solution composition on properties of activated carbon-based impregnated desiccants. *Physical chemistry*. 2023. Vol. 89. №10.

[122] Дудар І. Н., Швець В. В., Христич, О. В. Конструкційно-теплоізоляційні будівельні вироби з використанням вторинних сировинних матеріалів. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2022. Т. 3, № 99, С. 31-40. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt320224>

[123] O. E. Andreikiv. A method for the investigation of high-temperature hydrogen-assisted fracture of bimetallic structural elements. *Materials Science*. 2000. №36. P. 489-498. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1011345601578>

[124] Горюн О.О. Гідротермальна обробка та імпульсне насичення капілярно-пористих матеріалів : тези доп. Міжнародної наук.-технічн. конференції «Інноваційні технології в будівництві». (м. Вінниця, 10-12 листопада 2020 р.). Вінниця, 2016. С. 128-131.

[125] Tumadhir M. B. Properties of concrete containing paraffin wax. *Water repellent treatment of building materials*. 2006. p. 35-48.

[126] Darya L. Gurina, Yury A. Budkov, Mikhail G. Kiselev. Molecular aspects on impregnation of silica-based aerogels with mefenamic acid in supercritical carbon dioxide. *Journal of Molecular Liquids*. 2024. Vol. 415. 126358. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.126358>

[127] ДСТУ Б В.2.7-46:2010 Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови. [Чинний від 2011-09-01]. Вид. офіц. Київ, 2011. 14 с. (Інформація та документація).

[128] ДСТУ Б EN 197-1:2015 Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів. [Чинний від 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2016. 36 с. (Інформація та документація).

[129] ДСТУ Б В.2.7-32-95 Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови

[Чинний від 1995-01-01]. Вид. офіц. Київ, 1996. 16 с. (Інформація та документація).

[130] ДСТУ Б В.2.7-273:2011 Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови [Чинний від 2012-12-01]. Вид. офіц. Київ, 2012. 14 с. (Інформація та документація).

[131] ДСТУ Б В.2.7-75-98 Будівельні матеріали. Щебінь та гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови. [Чинний від 1999-01-01]. Вид. офіц. Київ, 1999. 16 с. (Інформація та документація).

[132] ДСТУ Б В.2.7-233:2010 Будівельні матеріали. Суміші будівельні рідкі модифіковані. Загальні технічні умови. [Чинний від 2011-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2010. 15 с. (Інформація та документація).

[133] ДСТУ Б В.2.7-42-97 Будівельні матеріали. Методи визначення водопоглинення, густини і морозостійкості будівельних матеріалів і виробів. [Чинний від 1997-07-01]. Вид. офіц. Київ, 1997. 31 с. (Інформація та документація).

[134] Горюн О. О. Теоретичні та експериментальні дослідження впливу вібрацій на зменшення сил тертя під час імпульсного насичення пористих матеріалів: тези доп. XLVI Міжнар. наук.-техн. конф. підрозділів Вінницького національного технічного університету. (м. Вінниця, 15-24 березня 2017 р.). Вінниця. 2017. С. 2043-2046.

[135] Горюн О. О. Проблемні питання математичного моделювання імпрегнування будівельних матеріалів на основі бетону за рахунок імпульсів тиску просочувальної рідини : тези доп. Міжнар.. наук.-техн. конф. «Енергоефективність в галузях економіки України». (м. Вінниця, 12-14 лист. 2019 р.) Вінниця, 2019. С. 244-247.

[136] ДСТУ Б В.2.7-224:2009 Бетони. Правила контролю міцності. [Чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ, 2010. 23 с. (Інформація та документація).

[137] ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. [Чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ, 2010. 43 с. (Інформація та документація).

[138] Бадьора Н. П., Коц І. В., Петрусь В. В. Планування експерименту для визначення основних параметрів роботи просочувального агрегату з гідроімпульсним приводом. Вісник Хмельницького національного університету. 2011. № 2. С. 48 – 51.

[139] Коц І. В. Розробка і дослідження клапанів-пульсаторів для гідравлічних приводів вібраційних і ударно-вібраційних вузлів гірничих машин: дис... канд. техн. наук : 05.02.03 . Вінниця, 1984. 345 с.

[140] Горюн О. О. Вплив води на руйнування бетонних структур і технологія для підвищення довговічності бетонів : тези доп. ЛІІ Всеукр. наук.-техн. конф. підрозділів Вінницького національного технічного університету. (м. Вінниця, 20-23 берез. 2024 р.). Вінниця, 2024. С. 1591-1593.

[141] Вировой В. М., Коробко О. А., Пархоменко Р. В., Суханов В. Г. Будівельні вироби та конструкції як відкриті складні самоорганізаційні системи. тези доп. Між народ.. наук.. конф. ВГАСУ, 2013.

[142] Коц І. В., Горюн О. О. Технологія та устаткування для імпульсного насичення спеціальними речовинами капілярно-пористих будівельних та інших видів матеріалів і виробів : тези доп. ХІХ Всеукр. наук.-техн. конф. «Потураєвські читання». (м. Дніпро, 22 квітня 2021 р.) Дніпро, 2021. С. 29.

[143] Горюн О. О. Гідрофобізація будівельних виробів з використанням устаткування для циклічного гідротермічного насичення. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2024. том. 36, №. 1, С. 58–63. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-58-63>.

[144] Горюн О. О. Устаткування для імпульсного насичення високотемпературними розчинами органічних матеріалів : тези доп. Міжнар. науково-технічної конференції «Енергоефективність в галузях економіки України». (м. Вінниця 17-19 листопада 2015 р.). Вінниця, 2015. С. 67.

[145] Коц І. В. Горюн О.О. Устаткування для гідроімпульсного насичення спеціальним розчином капілярно-пористих матеріалів : тези доп. Міжнародної наук.-технічн. конференції «Молодь в науці». м. Вінниця, 4-10 травня 2016 р. Вінниця, 2016. С. 144-145.

[146] Коц І. В., Горюн О. О. Математичне моделювання процесів насичення бетонних зразків під дією гідроімпульсного навантаження. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2019. №27, вип.2. С. 123–129. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-123-129>.

[147] Коц І. В., Горюн О. О. Вибір параметрів устаткування для просочення капілярно-пористих матеріалів : тези доп. Міжнар.. наук.-техн. конф. «Енергоефективність в галузях економіки» (м. Вінниця, 23-25 лист. 2021 р.) Вінниця, 2021. С. 385-386.

[148] Вознесенський В. А., Ляшенко Т. В. ЕС-моделі в комп'ютерному будівельному матеріалознавстві. Одеса. Астропринт. 2006. 116 с.

[149] Коц І. В., Горюн О. О. Особливості розповсюдження технологічних скріпних розчинів в пористій структурі щебеневої основи асфальтобетонного покриття при імпульсному ін'єкційному закріпленні. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2023. №35, вип. 2. С. 62-69. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-2-62-69>.

[150] Xun W., Wu Ch., Leng X., Li J., Xin D., Li Y. Effect of functional superplasticizers on concrete strength and pore structure. Applied Sciences. 2020. Vol. 10. 3496. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10103496>

[151] Горюн О. О. Аналітичний огляд факторів надійності устаткування для імпульсного гідротермічного імпрегнування будівельних матеріалів : тези доп. І Всеукр. наук.-техн. конф. факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання. м. Вінниця, 20-23 берез. 2021 р. Вінниця, 2020. С. 1811-1812.

[152] Горюн О. О. Побудова дерева логічного висновку та лінгвістична оцінка змінних параметрів, що впливають на технічний стан устаткування для імпрегнування будівельних виробів: тези доп. Всеукр. наук.-техн. конф.

«Енергоефективність в галузях економіки України», м. Вінниця, 21-23 лист. 2023 р. Вінниця, 2020. С. 323-325.

[153] Ратушняк, Г. С., Лялюк, О. Г., Горюн, О. Ю. Аналіз впливу факторів на надійність забезпечення енергоефективності огорожувальних конструкцій у вузлах примикання з використанням лінгвістичних змінних. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. 2022. №40, С. 28–36. DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2022.40.28-36>.

[154] Rotshtein A., Pustynnik L., Katielnikov D. Fuzzy cognitive maps in reliability modeling. *advancements in Fuzzy reliability theory*. 2021. P. 1 – 19. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-7564-2.ch001>.

[155] Спосіб виготовлення бетонополімерних виробів: пат. 142720 Україна. № u201911894; заявл. 13.12.2019 ; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12. 4 с.

[156] Коц І. В., Горюн О. О. Технологія та устаткування для імпульсного насичення будівельних виробів : тези доп. Міжнар.. наук.-техн. конф. «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» (м. Вінниця, 13-15 травня 2021 р.) Вінниця, 2021. С. 137-138.

[157] Горюн О. О. Використання модифікованої деревини для будівництва ефективних фортифікаційних споруд. : тези доп. Всеукр.наук.-практ. Інтерн.-конф.«Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)»,. м. Вінниця, 20 травня 2024 р. Вінниця, 2024. С. 1798-1801.

[158] Горюн О. О., Коц І. В. Спосіб імпульсного імпрегнування деревини для будівельних конструкцій. Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини. 2024. лип. №28. С. 121-127. DOI: <https://doi.org/10.31650/2707-3068-2024-28-121-127>

[159] Коц І. В., Горюн О. О. Устаткування для циклічного гідротермічного насичення мономерами бетонних та залізобетонних виробів : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» (м. Вінниця, 13-15 травня 2019 р.). Вінниця, 2019. С. 158-159.

[160] Коц І. В., Горюн О. О. Гідроімпульсне просочення будівельних виробів спеціальними рідинами, технології та обладнання. : тези доп. ЛІІ Всеукр.

наук.-техн. конф. підрозділів Вінницького національного технічного університету. м. Вінниця, 21-23 червня. 2023 р. Вінниця, 2023. С. 1666-1668.

[161] Горюн О.О. Гідротермальна обробка та імпульсне насичення капілярно-пористих матеріалів : тези доп. Всеукр. наук.-технічн. інтерн.-конф. «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи». (м. Вінниця, 14 травня 2021 р.). Вінниця, 2021. С. 6-9.

[162] Устаткування для циклічного гідротермічного насичення будівельних виробів: пат. 145860 Україна. № u202004696; заявл. 24.07.2020 ; опубл. 6.01.2021, Бюл. № 1. 6 с.

[163] Генератор імпульсів ін'єкційного пристрою для закріплення несучих основ споруд: пат. 117380 Україна. № u201700084; заявл. 03.01.2017 ; опубл. 26.06.2017, Бюл. № 12. 4 с.

[164] Ін'єктор для закріплення несучих основ споруд з імпульсною подачею суміші: пат. 117371 Україна. № u201700057 ; заявл. 03.01.2017 ; опубл. 26.06.2017, Бюл. № 12. 5 с.

[165] Устаткування для циклічного гідротермічного насичення бетонних та залізобетонних виробів: пат. 140195 Україна. № u201907557; заявл. 05.07.2019 ; опубл. 10.02.2020, Бюл. № 3. 5 с.

[166] Харів П.С., Вашків О.П., Собко О.М. Практикум з економіки і організації діяльності підприємств. Тернопіль: ТАНГ, 2002. – 324 с.

[167] Економіка інновацій: конспект лекцій / уклад. д.е.н., проф. О. Плахотнік. Кам'янське: ДДТУ, 2022. 62 с

[168] Калина А. В. Економіка праці та соціально-трудова відносини : навч. посіб. Київ : ДП «Вид. дім «Персонал», 2012. 498 с.

[169] Економіка підприємства: підручник / за заг. ред. д.е.н., проф. Л. Г. Мельника. Суми : Університетська книга, 2012. 648 с.

[170] Горлачук В.В., Яненкова І. Г. Економіка підприємства : навч. посіб. Миколаїв : Вид. ЧДУ ім. Петра Могили, 2010. 344 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

• матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що внесені до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук:

[1] Горюн О. О. Гідрофобізація будівельних виробів з використанням устаткування для циклічного гідротермічного насичення. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2024. № 36, вип. 1. С. 58–63.

DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-58-63>.

[2] Горюн О. О., Коц І. В. Спосіб імпульсного імпрегнування деревини для будівельних конструкцій. *Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини*. 2024. лип. №28. С. 121-127. DOI: <https://doi.org/10.31650/2707-3068-2024-28-121-127>.

[3] Коц І. В., Горюн О. О. Особливості розповсюдження технологічних скріпних розчинів в пористій структурі щебеневої основи асфальтобетонного покриття при імпульсному ін'єкційному закріпленні. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2023. №35, вип. 2. С. 62-69.

DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-2-62-69>.

[4] Горюн О. О. Аналітичне дослідження стану існуючих асфальто- та цементобетонних аеродромних покриттів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. №26, вип. 1. С. 38–42.

DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-1-38-42>.

[5] Коц І. В., Горюн О. О. Математичне моделювання процесів насичення бетонних зразків під дією гідроімпульсного навантаження. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2019. №27, вип. 2. С. 123–129.

DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-123-129>.

Документи інтелектуальної власності, що отримані за результатами дисертації:

• **патенти на корисну модель:**

[6] Устаткування для циклічного гідротермічного насичення будівельних виробів: пат. 145860 Україна. № u202004696; заявл. 24.07.2020 ; опубл. 6.01.2021, Бюл. № 1. 6 с.

[7] Спосіб виготовлення бетонополімерних виробів: пат. 142720 Україна. № u201911894; заявл. 13.12.2019 ; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12. 4 с.

[8] Устаткування для циклічного гідротермічного насичення бетонних та залізобетонних виробів: пат. 140195 Україна. № u201907557; заявл. 05.07.2019 ; опубл. 10.02.2020, Бюл. № 3. 5 с.

[9] Генератор імпульсів ін'єкційного пристрою для закріплення несучих основ споруд: пат. 117380 Україна. № u201700084; заявл. 03.01.2017 ; опубл. 26.06.2017, Бюл. № 12. 4 с.

[10] Ін'єктор для закріплення несучих основ споруд з імпульсною подачею суміші: пат. 117371 Україна. № u201700057; заявл. 03.01.2017 ; опубл. 26.06.2017, Бюл. № 12. 5 с.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[11] Горюн О. О. «Вплив води на руйнування бетонних структур і технологія для підвищення довговічності бетонів», на ЛІІІ наук.-техн. конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, Україна, 20-22 березня 2024 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/38408>.

[12] Горюн О. О. «Використання модифікованої деревини для будівництва ефективних фортифікаційних споруд» на Всеукраїнській наук.-практ. інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)», Вінниця, Україна, 11-20 травня 2024 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/43275/getfile.pdf>.

[13] Горюн О. О. «Побудова дерева логічного висновку та лінгвістична оцінка змінних параметрів, що впливають на технічний стан устаткування для

імпрегнування будівельних виробів» на Всеукраїнській наук.-техн. Конференції «Енергоефективність в галузях економіки України», Вінниця, Україна, 21—23 листопада 2023 р., URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2023/schedConf/overview>.

[14] Коц І. В., Горюн О. О. «Гідроімпульсне просочення будівельних виробів спеціальними рідинами, технології та обладнання» на ЛІІ Всеукраїнській наук.-техн. конф. факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання, Вінниця, Україна, 21-23 червня 2023 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/40897>.

[15] Горюн О. О. «Вибір параметрів устаткування для просочення капілярно-пористих матеріалів» на Всеукраїнській наук.-техн. Конференції «Енергоефективність в галузях економіки України», Вінниця, Україна, 23—25 листопада 2021 р., URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2021/paper/viewFile/13953/11813>

[16] Коц І. В., Горюн О. О. «Технологія та устаткування для імпульсного насичення спеціальними речовинами капілярно-пористих будівельних та інших видів матеріалів і виробів » на ХІХ Всеукраїнській наук.-техн. конференції «Потураєвські читання», Дніпро, Україна, 22 квітня 2021р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/32174>.

[17] Горюн О. О. «Гідротермальна обробка та імпульсне насичення капілярно-пористих матеріалів» на Всеукраїнській наук.-практ. інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2020)», Вінниця, Україна, 9 листопада 2020 р., URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2020/paper/view/10910/9098>.

[18] Горюн О. О. «Аналітичний огляд факторів надійності устаткування для імпульсного гідротермічного імпрегнування будівельних матеріалів» на ІІІ Всеукраїнській наук.-техн. конференції факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання, Вінниця, Україна, 20-23 березня 2021 р. URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp2021/paper/view/12422>.

- [19] Коц І. В., Горюн О. О. «Технологія та устаткування для імпульсного насичення будівельних виробів » на Міжнародній наук.-технічн. конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» , м. Вінниця, 13 – 15 травня 2021 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/36972/13463-48191-1-PB.pdf>.
- [20] Горюн О.О. «Гідротермальна обробка та імпульсне насичення капілярно-пористих матеріалів» на Міжнародній наук.-технічн. конференції «Інноваційні технології в будівництві», Вінниця, Україна, 10-12 листопада 2020 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/31876/%D0%93%D0%BE%D1%80%D1%8E%D0%BD.pdf>.
- [21] Горюн О.О. «Варіанти устаткування для імпульсного насичення будівельних виробів» на XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, Україна, 27-28 квітня 2020 р., URI: https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/1/vntu_2020_netpub.pdf.
- [22] Горюн О. О. «Проблемні питання математичного моделювання імпрегнування будівельних матеріалів на основі бетону за рахунок імпульсів тиску просочувальної рідини» на Всеукраїнській наук.-техн. Конференції «Енергоефективність в галузях економіки України», 12-14 листопада 2019 р., URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2019/paper/view/8244/6909>
- [23] Горюн О. О., Коц І. В. «Устаткування для циклічного гідротермічного насичення мономерами бетонних та залізобетонних виробів» на Міжнародній наук.-технічн. конференції «Перспективи розвитку машинобудування», Вінниця, Україна, 13 – 15 травня 2019 р. URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/23701>.
- [24] Горюн О. О. «Напрямки вдосконалення технологій виготовлення будівельних виробів на основі полімерного бетону для аеродромних покриттів» на XLVIII наук.-техн. конференції факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання, Вінниця, Україна, 13-15 березня 2019 р., URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2019/paper/view/7005/5793>.

[25] Горюн О. О., Коц І. В. «Аналітичний огляд недоліків існуючих цементобетонних аеродромних покриттів» на Міжнародній наук.-технічн. конференції «Інноваційні технології в будівництві», Вінниця, Україна, 13-15 листопада 2018 р., URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2018/paper/viewFile/5908/5015>.

[26] Горюн О. О. Коц І. В. «Устаткування комбінованої вакуумної та гідроімпульсної силової взаємодії з м'ясною сировиною при її масажуванні та насиченні рідкими інгредієнтами» на Всеукраїнській наук.-практ. інтернет-конференції «Інноваційні технології виробництва та переробки тваринницької продукції», Вінниця, Україна, 25-26 жовтня 2018 р.

[27] Горюн О. О. Коц І. В. «Аналітичний огляд та проблематика сучасних технологій виготовлення бетонополімерів» на XIII International scientific and practical Conference "Scientific horizons", Sheffield, UK. September 30-October 7, 2018. URI: <https://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/36924/1/SCIENTIFIC%20HORIZONS%20-%202018%20tom-5.pdf>.

[28] Горюн О. О. «Існуючі уявлення щодо механізму насичення будівельних матеріалів спеціальними речовинами» на Всеукраїнській наук.-практ. інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2018)», Вінниця, Україна, 6 червня 2018 р., URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2018/paper/view/5708>.

[29] Горюн О. О. Коц І. В. «Гідроімпульсне устаткування для інтенсифікації процесів масажування і насичення інгредієнтами м'ясної сировини» на Всеукраїнській наук.-практ. інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку тваринництва та харчової галузі», Вінниця, Україна, 26 квітня 2018 р.

[30] Коц І., В., Горюн О. О. «Аналітичний огляд та проблематика сучасних технологій виготовлення бетонополімерів» на XLVII Всеукраїнській наук.-техн. конф. факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання, Вінниця, Україна, , 14-23 березня 2018 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/21016/3909.pdf>.

[31] Коц І. В., Горюн О. О. «Устаткування для імпульсного насичення спеціальними рідинами органічних будівельних матеріалів та виробів» на Всеукраїнській наук.-техн. Конференції «Енергоефективність в галузях

економіки України», Вінниця, Україна, 23—11-13 листопада 2017 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/19623/Gorun%2C%20Kots%20%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B0.pdf>.

[32] Горюн О. О. «Теоретичні та експериментальні дослідження впливу вібрацій на зменшення сил тертя під час імпульсного насичення пористих матеріалів», на XLVI наук.-техн. конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, Україна, 15-24 березня 2017 р., URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itpf/all-fbtegp-2017/index>.

[33] Коц І. В., Горюн О. О. «Дослідження режимів гідро-імпульсного просочення спеціальними розчинами капілярно-пористих матеріалів в автоклавах» на Міжнародній наук.-технічн. конференції «Інноваційні технології в будівництві», Вінниця, Україна, 18-20 листопада 2016 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/19235/Goryn%20O.O.,%20Kots%20I.V..pdf>.

[34] Коц І. В., Горюн О. О. «Устаткування для гідроімпульсного насичення спеціальним розчином капілярно-пористих матеріалів» на Всеукраїнській наук.-практ. інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2018)», Вінниця, Україна, 4-10 травня 2016 р., URI: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/11707/%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%BA%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F%20%D0%B3%D1%96%D0%B4%D1%80%D0%BE%D1%96%D0%BC%D0%BF%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE.pdf>.

[35] Горюн О. О. «Дослідження процесів імпульсного насичення просочуваним розчином капілярно-пористих матеріалів» на XLV Всеукраїнській наук.-техн. конф. факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання, Вінниця, Україна, 2-11 березня 2016 р., URI: https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/1/fbtegp_2016_netpub.pdf#page=36.

[36] Коц І. В. Горюн О. О. «Устаткування для імпульсного насичення високотемпературними розчинами органічних матеріалів» на Міжнародній наук.-технічн. конференції «Енергоефективність в галузях економіки України», Вінниця, Україна, 17-19 листопада 2015 р., URI: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/11707>.

ДОДАТОК Б

**АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО
ДОСЛІДЖЕННЯ**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Директор ТОВ «ВІННИЦЯБУД»

Карло ГІГНІШВІЛІ

«7» серпня 2024 р.

А К Т

**впровадження результатів дисертаційної роботи
аспіранта Горюна Олега Олеговича
у практичну діяльність ТОВ «ВІННИЦЯБУД»**

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи Горюна О. О. на тему: «Модифікація будівельних виробів із бетону з використанням технології та устаткування для імпульсного імпрегнування», яка виконана за спеціальністю 192 - «Будівництво та цивільна інженерія» у Вінницькому національному технічному університеті, впроваджені у практичну діяльність підприємства ТОВ «ВІННИЦЯБУД».

Основні результати дисертаційного дослідження, що впроваджуються:

Розроблена технологія імпульсного імпрегнування будівельних виробів із бетону, що полягає застосуванні таких технологічних операцій: завантаження виробів із бетону до робочої камери, вакуумування, заповнення об'єму робочої камери рідким просочувальним складом, створення надлишкового тиску, створення імпульсів тиску рідини заданої величини та частоти повторювань імпульсного навантаження, зниження тиску до атмосферного, злив залишків просочувального складу, розгерметизація робочої камери та вивантаження оброблених виробів із бетону.

Автором детально досліджено вплив імпульсного імпрегнування на властивості бетону. Отримані результати свідчать про підвищення міцності виробів на стиск та згин, зменшення водопоглинання, покращення морозостійкості, зменшення водонепроникності тощо. Проведені у виробничих умовах випробування запропонованої технології імпульсного

імпрегнування будівельних виробів із бетону підтверджують ефективність розробленої технології.

Автором розробки передані рекомендації щодо раціональних режимів імпульсного імпрегнування для різних типів бетонних виробів та необхідного для цього складу імпрегнуючих складів. Вказані необхідні параметри щодо величини максимального тиску імпрегнуючого складу, тривалості імпульсного навантаження, частоти імпульсів тощо.

Передані креслення відповідного комплексу устаткування та спеціального гідравлічного генератора змінного тиску для практичної реалізації імпульсного імпрегнування оброблюваних будівельних виробів із бетону.

Проведені попередні розрахунки щодо очікуваного економічного ефекту від впровадження запропонованої технології за рахунок під зниження вартості матеріалів, підвищення продуктивності праці, зменшення браку, продовження терміну експлуатації бетонних виробів.

Висновок:

Впровадження результатів дисертаційного дослідження «Модифікація будівельних виробів із бетону з використанням технології та устаткування для імпульсного імпрегнування» дозволить підвищити довговічність та поліпшити експлуатаційні характеристики будівельних виробів із бетону, при зменшенні витрат на їх виробництво. Це свідчить про актуальність і практичну цінність проведеного дослідження.

Директор



Карло ГІГІНІШВІЛІ

Общество
с ограниченной ответственностью
«Грань»

Консультации, инженеринг,
строительством.



Товариство
з обмеженою відповідальністю
«Грань»

Консультації, інженеринг,
будівництво.



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ «Грань»

Сергій СТОРОЖУК

«21» серпня 2024 р.

А К Т

впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта Горюна Олега Олеговича у практичну діяльність ТОВ «Грань»

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи аспіранта Горюна Олега Олеговича на тему «Модифікація будівельних виробів із бетону з використанням технології та устаткування для імпульсного імпрегнування», яка виконана у Вінницькому національному технічному університеті, впроваджуються у виробничі процеси підприємства ТОВ «Грань».

Розроблена технологія та устаткування для імпульсного імпрегнування дозволяє виконувати обробку виробів із бетону підвищуючи їх гідрофобізуючі та міцнісні властивості, що забезпечує зменшення тривалості обробки та витрати компонентів при виробництві виробів із бетону.

Згідно запропонованим аспірантом Горюном О. О. технічним та технологічним рішенням за попередніми розрахунками очікується економічний ефект від економії матеріальних та трудових ресурсів при виготовленні бетонних виробів різних видів, поліпшення їх фізико-механічних характеристик, що свідчить про перспективність їх використання в практиці будівельного виробництва.

Директор

Сергій СТОРОЖУК

Офіс: 11500 Україна, г.Коростень,
ул. Коротуна 1, офіс №8
Р/с UA383510050000026007632967900
МФО 351005 ,Код ЗКПО 30740988
інд. налігвовий номер 307409806099
Тел.0674303453 tovgran@gmail.com

Офіс: 11500 Україна, м.Коростень,
Вул Коротуна 1., офіс №8
Р/р UA 383510050000026007632967900
МФО 351005 ,Код ЗКПО 30740988
інд. податковий номер 307409806099
Тел.0674303453 tovgran@gmail.com

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор Хмельницької філії
Державного підприємства
Науково-дослідний проектно-вишукувальний інститут
«ІНЖИПРОЕКТРЕКОНСТРУКЦІЯ»
Андрій ТРУБАЄНКО
«30» жовтня 2024 р.



**Акт впровадження результатів
дисертаційної роботи аспіранта
ГОРЮНА Олега Олеговича
у практичну діяльність підприємства**

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи Горюна Олега Олеговича на тему: «Модифікація будівельних виробів із бетону з використанням технології та устаткування для імпульсного імпрегнування», виконаної за спеціальністю 192 - «Будівництво та цивільна інженерія» у Вінницькому національному технічному університеті, впроваджені у практичну діяльність інституту.

Основні результати дисертаційного дослідження, що впроваджуються:

1. Розроблена технологія імпульсного імпрегнування будівельних виробів із бетону, що включає такі технологічні операції:
 - Завантаження виробів із бетону до робочої камери.
 - Вакуумування.
 - Заповнення об'єму робочої камери рідким просочувальним складом.
 - Створення надлишкового тиску.
 - Створення імпульсів тиску рідини заданої величини та частоти повторювань.
 - Зниження тиску до атмосферного.
 - Злив залишків просочувального складу.
 - Розгерметизація робочої камери та вивантаження оброблених виробів із бетону.

2. Детальне дослідження впливу імпульсного імпрегнування на властивості бетону, що підтверджується такими результатами:
 - Підвищення міцності виробів на стиск та згин.
 - Зменшення водопоглинання.
 - Зменшення водонепроникності.
3. Проведені випробування у виробничих умовах, що підтверджують ефективність запропонованої технології імпульсного імпрегнування.
4. Розроблені рекомендації щодо раціональних режимів імпульсного імпрегнування для різних типів бетонних виробів та складу імпрегнуючих розчинів, включаючи:
 - Величину максимального тиску імпрегнуючого розчину.
 - Тривалість імпульсного навантаження.
 - Частоту імпульсів.
5. Передані відповідні рекомендації щодо вибору параметрів та режимів імпрегнування, а також креслення окремих вузлів обладнання та спеціального гідравлічного генератора створення змінного тиску для реалізації імпульсного імпрегнування.
6. Проведені попередні розрахунки щодо очікуваного економічного ефекту, які показують:
 - Зниження вартості матеріалів.
 - Підвищення продуктивності праці.
 - Зменшення браку.
 - Продовження терміну експлуатації бетонних виробів.

Висновок: Впровадження результатів дисертаційного дослідження Горюна О.О. «Модифікація будівельних виробів із бетону з використанням технології та устаткування для імпульсного імпрегнування» дозволить покращити фізико-механічні характеристики, підвищити довговічність та поліпшити експлуатаційні характеристики будівельних виробів із бетону при зменшенні витрат на їх виробництво. Це в цілому свідчить про актуальність і практичну цінність проведеного дослідження.

Директор _____



_____ Андрій ТРУБАЧЕНКО

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з науково-педагогічної
роботи та організації освітнього
процесу
Вінницького національного
технічного університету

«14» 08 2024 р.
 Олександр ПЕТРОВ

А К Т




**впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи
Горюна Олега Олеговича
на тему: «Модифікація будівельних виробів із бетону з використанням
технології та устаткування для імпульсного імпрегнування»,
представленої до захисту на здобуття наукового ступеня
доктора філософії зі спеціальності
192 - Будівництво та цивільна інженерії**

Комісія Вінницького національного технічного університету у складі:
голова комісії – завідувач кафедри інженерних систем, к.т.н., професор
Георгій РАТУШНЯК та члени комісії: завідувач кафедри будівництва,
міського господарства та архітектури, к.т.н., доцент Віталій ШВЕЦЬ;
к.т.н., доцент кафедри інженерних систем у будівництві Наталя
СЛОБОДЯН, склали цей акт про підтвердження того, що результати
дисертаційних досліджень аспіранта ГОРЮНА Олега Олеговича
впроваджено у навчальний процес (лекції, практичні заняття) за
спеціальністю 192 – «Будівництво та цивільна інженерія», а саме:

– у тематиці лекцій щодо застосування спеціалізованого технологічного
устаткування для покращення фізико-механічних характеристик
будівельних виробів із бетону та інших матеріалів – дисципліна
«Будівельна техніка та виробнича база»;

- ньютонівські та неньютоновські рідини, устаткування для нагнітання рідин та газів, фільтрація рідин, рух рідини у трубопроводах, порах, капілярах тощо – дисципліни «Прикладна механіка рідин та газів», «Гідроаеродинаміка машин та систем ТПП і В»;
- покращення фізико-механічних характеристик, водостійкості, надійності та довговічності будівельних виробів із бетону, деревини та інших матеріалів – дисципліни «Будівельне матеріалознавство», «Будівельні конструкції».

Впровадження матеріалів за результатами дисертаційного дослідження у навчальний процес забезпечують підвищення ефективності навчання студентів, а також якості підготовки фахівців з будівництва та цивільної інженерії.

Голова комісії _____  Георгій РАТУШНЯК
Члени комісії: _____  Віталій ШВЕЦЬ
_____  Наталя СЛОБОДЯН