

Міністерство освіти і науки України
Одеська державна академія будівництва та архітектури

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Непомящий Олександр Миколайович

УДК 666.974.6

ДИСЕРТАЦІЯ

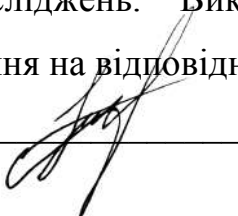
МЕХАНІЗМ ОПОРУ МОРОЗНОМУ РУЙНУВАННЮ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Спеціальність 05.23.05 – Будівельні матеріали та вироби

Галузь знань 19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня *кандидата технічних наук*

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

 О.М.Непомящий

Науковий керівник:

Вировой Валерій Миколайович, доктор технічних наук, професор

Одеса – 2021

АНОТАЦІЯ

Непом'яций О.М. Механізм опору морозному руйнуванню будівельних конструкцій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 "Будівельні матеріали та вироби " (19 – Архітектура та будівництво). – Одеська державна академія будівництва та архітектури, Одеса, 2021.

Дисертація присвячена актуальній проблемі – врахування впливу умов заморожування зразків (виробів, конструкцій) на морозостійкість будівельних композиційних матеріалів.

Метою роботи є врахування способу заморожування зразків для оцінки морозостійкості матеріалу з урахуванням виду та умов експлуатації виробів і конструкцій.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, наведено мету і завдання досліджень, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, дані про апробацію та опублікування результатів досліджень, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі приведено короткий огляд умов експлуатації будівельних виробів, конструкцій, будівель та споруд, проаналізовані основні причини і механізми, які викликають зниження експлуатаційних властивостей матеріалів при їх багаторазовому заморожуванні і відтаванні.

Багаторічні та всебічні дослідження фахівців свідчать, що до основних причин зниження морозостійкості будівельних матеріалів, як капілярно-пористих тіл, слід віднести критичні деформації та напруження, які виникають при замерзанні води в їх порах і капілярах.

Для забезпечення опору негативній дії замерзаючої води, на думку багатьох фахівців, в матеріалі мають бути так звані "резервні пори", в які здатна мігрувати вода. На думку Г.І. Горчакова, А.М. Підвального та інших, морозостійкість матеріалу залежить від співвідношення коефіцієнтів термічного розширення матричного матеріалу та заповнювачів.

Разом з порами і капілярами в будівельних композитах присутні специфічні несучільності у вигляді тріщин та внутрішніх поверхонь розділу, що вказує на значне зниження в'язкості руйнування бетонів та інших будівельних матеріалів при їхньому багаторазовому заморожуванні і відтаванні.

Накопичений досвід багатьох поколінь дослідників свідчить, що багаторазове заморожування та відтавання є однією з самих несприятливих дій природних факторів на будівельні вироби і конструкції. Тому, при визначенні терміну експлуатації багатьох конструкцій, визначають для них певну морозостійкість – кількість циклів заморожування та відтавання, при яких зберігаються основні фізико-механічні властивості матеріалів. Базова методика отримання кількісних показників морозостійкості пов'язана з багаторазовим об'ємним заморожуванням насичених водою зразків. В той же час аналіз умов експлуатації дозволив прийти до висновку, що значна кількість будівельних об'єктів сприймають дію навколишнього середовища тільки однією своєю поверхнею. Така дія була віднесена до однобічної. Зміна умов дії зовнішніх чинників з об'ємних до однобічних має викликати зміну внутрішніх процесів масопереносу, прояву термічних ефектів, що має викликати зміну виникаючих локальних та інтегральних об'ємних деформацій. Сукупна дія різних за проявом процесів в залежності від умов дії зовнішніх чинників повинні привести до різних впливів на властивості матеріалів. Особливо це має проявитись при багаторазовому заморожуванні та відтаванні. Наведені положення лягли в основу прийнятої *робочої гіпотези* – зміна умов багаторазового заморожування та відтавання веде до зміни внутрішніх процесів масопереносу, термічних ефектів, розвитку локальних та інтегральних деформацій, що викличе різні структурні зміни, які призведуть до зміни властивостей і зміни морозостійкості матеріалу. Для реалізації основних положень робочої гіпотези були визначені мета і задачі досліджень.

У *другому розділі* надано основні характеристики застосованих сировинних матеріалів та методи досліджень, які використовувались в роботі.

Дослідження фізико-механічних властивостей цементного тіста, цементного каменю, бетонної суміші та бетону проводилися згідно з діючими стандартами та загальноприйнятими методиками відповідно до ДСТУ.

Для виявлення технологічних тріщин в цементному камені і бетоні був прийнятий метод, описаний в патенті України на винахід № 5735. Прийнятий метод був закладений в основу кількісної оцінки зміни структури цементного каменю, розчину та бетонів шляхом визначення зміни коефіцієнта пошкодженості (K_p) в умовах багаторазового заморожування та відтавання. Коефіцієнт пошкодженості (K_p) зразків визначався двома способами:

- як співвідношення $K_p = \Sigma L_i / S$, см/см², де: ΣL_i , см – сумарна протяжність тріщин та внутрішніх поверхонь розділу на поверхні зразка; S , см² – фіксована площа поверхні зразка;

- як співвідношення $K_{p1} = \Sigma L_i / L_i$, де: ΣL_i , см – фактична довжина тріщини руйнування; L_i , см – найкоротша відстань між точками виходу фактичної тріщини руйнування на поверхні зразка.

Для зіставлення результатів досліджень використовували зразки-призми розміром 4×4×16 см та 10×10×40 см.

Через кожних п'ять циклів заморожування-відтавання контролювали зміну: маси (Δm), водопоглинання (W), швидкості проходження ультразвуку (v), коефіцієнта пошкодженості (K_p), міцності на розтяг при згині ($f_{c,tf}$), міцності на розтяг при розколюванні ($f_{c,tn}$), міцності на стиск ($f_{c,cube}$), коефіцієнта стійкості на розтяг при згині ($K_{ct}(f_{c,tk})$), коефіцієнта стійкості на розтяг при розколюванні ($K_{ct}(f_{c,tn})$) та коефіцієнта стійкості на стиск ($K_{ct}(f_{c,cube})$).

Для аналізу однобічного заморожування була розроблена оригінальна методика дослідження.

Для аналізу розвитку об'ємних змін в зразках в залежності від умов заморожування використовувався графоаналітичний метод, який дозволив отримати кількісні та якісні залежності. Крім того, графоаналітичний метод дозволив проаналізувати механізми розвитку тріщин при замерзанні в їх об'ємі вільної води.

Для статистичної обробки експериментальних даних використовувалися математичні методи та засоби аналізу результатів.

В *третьому розділі* наведені результати аналізу розподілу об'ємних локальних та загальних об'ємних деформацій в капілярно-пористих матеріалах в залежності від умов заморожування зразків.

Прийнято вважати, що лід, який утворюється при замерзанні води в капілярах, тисне на ще незамерзлу воду, що веде до її видалення з об'єму капіляра.

Подібний механізм переміщення води має привести до руйнування зразка (виробу) зсередини. За весь період спостережень за поведінкою будівельних виробів і конструкцій та при вивченні морозостійкості на окремих зразках не описаний характер руйнування "зсередини – назовні". Така неузгодженість зумовила поставити задачу з аналізу процесів, які відбуваються при замерзанні води в окремому капілярі (локалізація процесів).

Тиск льоду на стінки капілярів викликає їх переміщення, що веде до зміни геометричних характеристик капілярів (тріщин). На зміну геометричних характеристик капілярів, а також інших несучільностей впливають деформації, викликані зміною температури твердої складової матеріалу. Сукупна дія деформацій від дії льоду та термічних деформацій веде до переміщення стінок капіляру або берегів тріщини та поверхонь розділу.

Зменшення тиску в об'ємі капіляра веде до виникнення градієнту тиску на границі переходу "лід-поліадсорбційна вода" за рахунок атмосферного тиску. Різностямована дія тиску льоду та атмосферного тиску веде до можливого виникнення та розвитку деформацій зсуву, що може спричинити утворення нових несучільностей.

Зміна геометричних характеристик несучільностей при одночасній зміні їх об'єму та внутрішнього тиску веде до прояву ефектів чергового масо переносу – міграції вільної води з глибинних об'ємів матеріалу.

Процеси та явища, які розвиваються в окремому капілярі при замерзанні в його об'ємі води, притаманні всій сітці несучільностей, що дозволяє

проаналізувати розвиток подій в інтегральній капілярно-пористій структурі матеріалу.

За рахунок перепаду тиску в сітці капілярів, відбувається направлена міграція вологи з глибинних об'ємів матеріалу. Крім того, в капілярно-пористих тілах вода переміщується в напрямку ділянок з більш низькою температурою.

По мірі переміщення фронту промерзання в глибинних зонах зразка зменшується водонасичення матеріалу. Вірогідно, що неповне заповнення водою капілярів та тріщин змінює характер розвитку вологісних деформацій та проявляється "ефект Ребіндера".

Таким чином, при об'ємному заморожуванні, внаслідок внутрішньої міграції води назустріч фронту промерзання формується певний деформаційний стан, що спричиняє процес руйнування поверхневих шарів зразків.

При однобічному заморожуванні утворюється фронт промерзання, який, в свою чергу, ініціює процеси вологопереносу з незамерзаючої частини зразка.

Вплив умов заморожування на формування та розвиток фронтів промерзання має викликати зміну розвитку об'ємних деформацій в зразках. Вплив умов заморожування на розподіл деформацій в зразках розміром $a \times a \times 4a$ аналізувався за допомогою графоаналітичного методу.

Прийнятий метод дозволяє проаналізувати розвиток деформацій при замерзанні води та розвитку фронту промерзання в залежності від умов заморожування. При цьому метод дозволяє виявити відносну величину переміщень окремих точок та їх напрям при сталій системі координат.

Таким чином, як показали проведені дослідження, умови заморожування змінюють умови формування фронту промерзання, що веде до перерозподілу вологи в об'ємі матеріалу. В свою чергу, перерозподіл вологи викликає зміну об'ємних деформацій в залежності від умов заморожування, що має відображатись на зміні фізико-механічних показників матеріалу та його морозостійкості.

В *четвертому розділі* наведені експериментальні результати досліджень щодо впливу умов заморожування на зміну структури, фізико-механічних властивостей та морозостійкості будівельних композитів.

Структурні зміни цементного каменю, розчину та бетону аналізувалися опосередковано за зміною коефіцієнтів пошкодженості в залежності від умов заморожування зразків.

Поява нових несучільностей в зразках із цементного каменю та розчину веде до зміни водопоглинання в залежності від умов заморожування. Дослідження показали, що при зволоженні в сольових розчинах з подальшим заморожуванням та відтаванням частина солей залишається в капілярно-поровому просторі матеріалів. Дослідження показали, що глибина карбонізації в умовах об'ємного заморожування збільшується в два рази порівняно з глибиною карбонізації зразків при однобічній дії від'ємних температур. Прямим підтвердженням залежності зміни структури від умов заморожування є результати зміни швидкості проходження ультразвуку в різних зонах зразків.

Зміна структури та зміни фізичних характеристик в залежності від умов заморожування зразків викликають зміну міцності на стиск та на розтяг при згині.

Таким чином при однобічному заморожуванні змінюються як фізичні, так і механічні властивості матеріалу одного й того самого зразка.

У *п'ятому розділі* приведені результати щодо впливу умов заморожування зразків на морозостійкість бетону.

Проведені дослідження показали, що для зразків із бетону зберігаються основні залежності впливу умов дії від'ємних температур такі самі як і для зразків із цементного каменю та розчину.

Про наявність структурних змін в залежності від умов заморожування свідчить (опосередковано) зміна коефіцієнтів пошкодженості. В свою чергу збільшення K_n більш ніж в 2 рази веде до зміни водопоглинання та глибини карбонізації. При цьому кількісні характеристики (коефіцієнт пошкодженості, водопоглинення, швидкість проходження ультразвуку) від 10 до 40% менші при однобічному заморожуванні порівняно з об'ємним заморожуванням.

Проведені дослідження показали, що матеріал зразків та самі зразки (вироби, конструкції та ін.) здатні самовільно змінювати свою реакцію в залежності від зміни умов дії навколишнього середовища (наприклад, всебічного або однобічного). Особливо це відчутно в умовах багаторазового заморожування та відтавання. При цьому встановлено, що морозостійкість матеріалу (в нашому випадку цементного каменю, розчину та бетону) підвищується до 20% при однобічному заморожуванні зразків. Як показав проведений аналіз умов експлуатації будівельних виробів, будівель та споруд, значна їх кількість в період експлуатації сприймає однобічну дію навколишнього середовища, включаючи багаторазове заморожування та відтавання. Це зумовило необхідність розробки рекомендацій з оцінки морозостійкості будівельних матеріалів в залежності від умов експлуатації об'єктів, для яких вони призначені. Врахування виявлених залежностей в діючих нормативних документах дасть змогу більш диференційовано назначати вимоги з морозостійкості матеріалів, що неминуче призведе до зниження матеріалоємності виробів при одночасному підвищенні рівня безпечного функціонування. В цьому, на наш погляд, полягає практичне значення виконаних досліджень, що підтверджує акт про впровадження (ТОВ "ЕЛЕМЕНТ", м. Одеса). Крім того, використання окремих розділів досліджень в навчальному процесі в циклах лекцій та практичних роботах за дисциплінами, пов'язаними з технологією, структуроутворенням та експлуатацією будівельних матеріалів та виробів, більш широко розкриває взаємозв'язок між матеріалами та виробами, дає змогу розширити варіативність при прийнятті раціональних рецептурно-технологічних рішень. Теоретичні та експериментальні дослідження використовуються в навчальному процесі при підготовці здобувачів першого (бакалаврського) рівня галузі знань 19 "Архітектура та будівництво" спеціальності 192 "Будівництво та цивільна інженерія". В сукупності це призводить до підвищення та поглиблення знань здобувачів.

Ключові слова: властивості матеріалу, локальне і об'ємне заморожування і відтавання, структурні зміни, тріщини, внутрішні деформації.

SUMMARY

Nepomyashchyi O.M. Mechanism of resistance to frost destruction of building structures. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.23.05 "Building materials and products" (19 – Architecture and construction). – Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, 2021.

The dissertation is devoted to an actual problem – the account of influence of conditions of freezing of samples (products, structures) on frost resistance of building composite materials..

The aim of the work is to take into account the method of freezing samples to assess the frost resistance of the material depending on type and operating conditions of products and structures.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, the purpose and objectives of research, scientific novelty and practical significance of the results, data on approbation and publication of research results, structure and volume of work.

The first section provides a brief overview of the operating conditions of construction products, buildings and structures, analyzes the main causes and mechanisms that cause a decrease in the performance of materials during their repeated freezing and thawing.

Perennials and comprehensive research by experts shows that the main reasons for the reduction of frost resistance of building materials, such as capillary-porous bodies, include critical deformations and stresses that occur when water freezes in their pores and capillaries.

In order to provide resistance to negative effects of freezing water, according to many experts, there are so-called "reserve pores" should be in material, into which water can migrate. According to G. Gorchakov, A. Pidvalniy and others, frost resistance of material depends on the ratio of the coefficients of thermal expansion of the matrix material and aggregates.

Along with pores and capillaries in building composites there are specific imperfections in the form of cracks and internal section surfaces, which indicates a significant reduction in the fracture toughness of concrete and other building materials during their repeated freezing and thawing.

The accumulated experience of many generations of researchers shows that repeated freezing and thawing is one of the most adverse effects of natural factors on building products and structures. Therefore, when determining the service life of many structures, determine for them a certain frost resistance – the number of cycles of freezing and thawing, which preserve the basic physical and mechanical properties of materials. The basic method of obtaining quantitative indicators of frost resistance is associated with multiple volumetric freezing of water-saturated samples. At the same time, the analysis of operating conditions led to the conclusion that a significant number of construction objects perceive the impact of the environment with only one surface. This action was attributed to one-sided. Changing the conditions of external factors from volumetric to unilateral should cause a change in the internal processes of mass transfer, appearance of thermal effects, which should cause a change in the resulting local and integral volumetric deformations. The combined action of different processes depending on the conditions of external factors should lead to different effects on the properties of materials. This is especially actual with repeated freezing and thawing. These provisions formed the basis of the accepted *working hypothesis* – changing conditions of repeated freezing and thawing leads to changes in internal mass transfer processes, thermal effects, development of local and integral deformations, which will cause various structural changes that will change properties and frost resistance of the material. To implement the main provisions of the working hypothesis, the purpose and objectives of the research were defined.

The second section presents the main characteristics of the raw materials and research methods used in the work.

Studies of physical and mechanical properties of cement paste, cement stone, concrete mix and concrete were carried out in accordance with current standards and generally accepted methods in accordance with National Standards of Ukraine.

In order to detect technological cracks in cement stone and concrete, the method described in the patent of Ukraine for the invention №5735 was used. This method was the basis for quantitative assessment of changes in the structure of cement stone, mortar and concrete by determining the change in the coefficient of damage (K_p) under conditions of repeated freezing and thawing. The coefficient of damage (K_p) of the samples was determined in two ways:

- as the ratio $K_p = \Sigma L_i / S$, cm/cm², where: ΣL_i , cm – total length of cracks and internal section surfaces on the sample surface; S , cm² – fixed surface area of the sample;

- as the ratio $K_{p1} = \Sigma L_i / L_i$, where: ΣL_i , cm – actual length of the fracture crack; L_i , cm – shortest distance between the exit points of the actual fracture crack on the sample's surface.

Samples of prism with sizes 4×4×16 cm and 10×10×40 cm were used to compare the results of the research.

After every five freeze-thaw cycles, the next changes were controlled: mass (Δm), water absorption (W), ultrasonic velocity (v), damage coefficient (K_p), tensile strength in bending ($f_{c.tk}$), tensile strength in splitting ($f_{c.tm}$), compressive strength ($f_{c.cube}$), carbonization depth (G_k).

Research methods and equipment were developed for the analysis of unilateral freezing.

A graph-analytical method was used to analyze the development of volumetric changes in the samples depending on the freezing conditions, which allowed to obtain quantitative and qualitative dependences. In addition, the graph-analytical method allowed to analyze the mechanisms of crack development during freezing of free water in their volume.

Mathematical methods and methods of analysis of results were used for statistical processing of experimental data.

The third section presents the results of the analysis of the distribution of volumetric local and total volumetric deformations in capillary-porous materials depending on the freezing conditions of the samples.

It is believed that the ice formed during the freezing of water in the capillaries, presses on the still unfrozen water, which leads to its removal from the volume of the capillary.

Such a mechanism of water movement should lead to the destruction of the sample (product) from the inside. During the entire period of observations on the behavior of building products and structures and in the study of frost resistance on individual samples, the nature of the destruction "from inside to outside" is not described. This inconsistency led to the task of analyzing the processes that occur when water freezes in a separate capillary (localization of processes).

The pressure of ice on the sides of the capillaries causes them to move, which leads to a change in the geometric characteristics of the capillaries (cracks). The change in the geometric characteristics of capillaries, as well as other discontinuities, is influenced by deformations caused by changes in the temperature of the solid component of the material. The combined effect of deformations from the action of ice and thermal deformations leads to the movement of the sides of the capillary or the edges of the crack and the section surfaces.

Decreasing the pressure in the capillary volume leads to a pressure gradient at the interface of the "ice-polyadsorption water" transition due to atmospheric pressure. The different effects of ice pressure and atmospheric pressure lead to the possible occurrence and development of shear deformations, which can lead to the formation of new discontinuities.

Changing the geometric characteristics of discontinuities while changing their volume and internal pressure leads to the effects of another mass transfer – the migration of free water from deep volumes of material.

Processes and phenomena that develop in a separate capillary during freezing of water in its volume, inherent in the whole network of discontinuities, which allows us to analyze the development of events in the integrated capillary-porous structure of the material.

Due to the pressure difference in the capillary network, there is a directed migration of moisture from the deep volumes of the material. In addition, in capillary-porous bodies, water moves in the direction of areas with lower temperatures.

As the freezing front moves in the deep zones of the sample, the water saturation of the material decreases. It is probable that incomplete filling of capillaries and cracks with water changes the nature of the development of moisture deformations and the manifestation of "Rebinder effects".

Thus, during volumetric freezing, due to the internal migration of water towards the freezing front, a certain deformation state is formed, which causes the process of destruction of the surface layers of the samples.

During unilateral freezing the freezing front is formed, which, in turn, initiates processes of moisture transfer from a non-freezing part of a sample.

The influence of freezing conditions on the formation and development of freezing fronts should cause a change in the development of volumetric deformations in the samples. The influence of freezing conditions on the distribution of deformations in samples of size $a \times a \times 4a$ was analyzed using a graph-analytical method.

This method allows to analyze the development of deformations during water freezing and the development of the freezing front depending on the freezing conditions. In addition the method allows to detect the relative magnitude of the displacements of individual points and their direction with a constant coordinate system.

Thus, studies have shown that freezing conditions change the conditions for the formation of the freezing front, which leads to a redistribution of moisture in the volume of material. In turn, the redistribution of moisture causes a change in volumetric deformations depending on the freezing conditions, which should be reflected in changes in the physical and mechanical properties of the material and its frost resistance.

The fourth section presents the experimental results of research on the influence of freezing conditions on the change in the structure, physical and mechanical properties and frost resistance of building composites.

Structural changes of cement stone, mortar and concrete were analyzed indirectly by changes in the coefficients of damage depending on the freezing conditions of the samples.

The appearance of new imperfections in the samples of cement stone and mortar leads to a change in water absorption depending on the freezing conditions. Studies have shown that when moistened in saline solutions, followed by freezing and thawing, some of the salts remain in the capillary-pore space of the materials. Direct confirmation of the dependence of the change in structure on the freezing conditions are the results of changes in the speed of ultrasound in different areas of the samples.

Changes in the structure and changes in physical characteristics depending on the freezing conditions of the samples cause a change in compressive and tensile strength in bending.

Thus during unilateral freezing both physical and mechanical properties of material of the same sample have changes.

The fifth section presents the results on the influence of freezing conditions of the samples on the frost resistance of concrete.

Studies have shown that for concrete samples the main dependences of the influence of negative temperature conditions remain the same as for samples of cement stone and mortar.

The presence of structural changes depending on the freezing conditions is evidenced (indirectly) by the change in the coefficients of damage. In turn, an increase in K_p more than 2 times. At the same time quantitative characteristics (coefficient of damage, water absorption, speed of passage of ultrasound) from 10 to 40% are less at unilateral freezing in comparison with volume freezing.

Studies have shown that the material of the samples and the samples themselves (products, structures, etc.) are able to arbitrarily change their reaction depending on changes in environmental conditions (eg, comprehensive or unilateral). This is especially noticeable in conditions of repeated freezing and thawing. It was found that the frost resistance of the material (in our case, cement stone, mortar and concrete) increases to 20% with unilateral freezing of samples. As shown by the analysis of the

operating conditions of construction products, buildings and structures, a significant number of them during operation perceives the unilateral action of the environment, including repeated freezing and thawing. This necessitated the development of recommendations for assessing the frost resistance of building materials depending on the operating conditions of the facilities for which they are intended. Taking into account the identified dependencies in the current regulations will allow more differentiated requirements for frost resistance of materials, which will inevitably lead to a decrease in material consumption of products while increasing the level of safe operation. In our opinion, this is the practical significance of the performed research, which confirms the act of implementation (LLC "ELEMENT", Odessa). In addition, the use of separate sections of research in the educational process in cycles of lectures and practical work in disciplines related to technology, structure and operation of building materials and products, more widely reveals the relationship between materials and products, allows to expand variability in acceptance rational prescription and technological solutions. Theoretical and experimental research is used in the educational process in the training of applicants in the field of knowledge 19 "Architecture and Construction" specialty 192 "Construction and Civil Engineering". In a complex this leads to an increase and deepening of knowledge of participants in the learning process.

Keywords: material properties, local and volumetric freezing and thawing, structural changes, cracks, internal deformations.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Выровой В. Н., Коробко О. А., Непомящий А. Н. Роль деформаций в формировании начальной поврежденности конструкции-системы. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк, 2015. Вип. 3. С.45–52.
2. Выровой В. Н., Суханов В. Г., Коробко О. А., Закорчемная Н. О., Непомящий А. Н. Сопротивление морозному разрушению бетонов для дорожного покрытия. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2015. Вип. 58. С.88–95.
3. Коробко О. А., Выровой В. Н., Непомящий А. Н., Шевченко В. В. Спонтанная перестройка структуры бетона при знакопеременных воздействиях. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне, 2016. Вип. 33. С. 54–61.
4. Непомнящий А. Н., Выровой В. Н. Анализ методов количественной оценки поврежденности материала конструкции. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2016. Вип. 63. С.174–178.
5. Коробко О. О., Вировой В. М., Уразманова Н. Ф., Непомящий О.М. Підвищення стійкості будівельних виробів при малоцикловій утомі бетону. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне, 2018. Вип. 36. С. 124–131.
6. Nepomyashchy O. M., Vyrovoy V. M., Makarova S. S., Khomenko A. A. Frost Resistance of Construction Composites During One-sided Freezing. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. Odessa, 2020. no.79. P. 109–116.

DOI: 10.31650/2415-377X-2020-79-109-116

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:

7. Непомящий А. Н., Выровой В. Н., Суханов В. Г. Влияние условий замораживания на морозостойкость строительных композитов. *Эксперт: теория и практика*. Тольятти, 2020. №4 (7). С. 41–46.

DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10034 ISSN: 2686-7818

8. Nepomyach A. N., Vyrovoy V. N., Chistyakov A. A. Frost resistance of cement-sand and concrete beams during unilateral freezing. *Croatian Regional Development Journal*. 2021. Vol. 1, no. 2. Pp. 1–12.

DOI: 10.31650/2415-377X-2020-79-109-116 ISSN: 2718-4978

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Непомящий О. М. Вплив місцевого заморожування на стійкість будівельних композитів. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті* : тези доп. 6-ї міжнар. наук.-техн. конф. Харків, 2017. С.86.

10. Виноградский В. М., Ткаченко Г. Г., Непомнящий А. Н., Портасова А. Д. Характер изменения свойств бетонов при одностороннем замораживании изделий. *Експлуатація та реконструкція будівель і споруд* : тези доп. II міжнар. конф., м. Одеса, 16-17 листоп. 2017 р. Одеса, 2017. С. 21–24.

11. Елькин А. В., Выровой В. Н., Шевченко В. В., Непомнящий А. Н. Роль активных элементов структуры в формировании свойств строительных композитов. *Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси* : зб. Тез доп. другої наук.-практ. конф. (м. Одеса, 27-29 вересня 2018 р.). Одеса, 2018. С. 75.

12. Непомящий А. Н., Макарова С. С., Ткаченко Т. Г. Вплив умов заморожування на морозостійкість бетонів. *Моделирование и оптимизация строительных композитов* : материалы междунар. сем., г. Одесса, 22-23 нояб. 2018 г. Одесса, 2018. С. 103–106.

13. Непомящий А. Н., Хоменко А. А., Портасова А. Д. Циклические воздействия окружающей среды на конструкцию. *Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій* : зб. тез доп. міжнар. конф. (м. Одеса, 11-13 квіт. 2018 р.). Одеса, 2018. С. 106–109.

14. Непомящий А. Н., Вировой В. Н., Хоменко А. А., Макарова С. В. Воздействие условий замораживания на свойства композиционных строительных материалов. *Моделирование и оптимизация строительных композитов* : материалы междунар. сем. г. Одесса, 21-22 нояб. 2019 г. Одесса, 2019. С. 126–129.

15. Непомящий А. Н., Хоменко А. А., Ткаченко Г. Г., Каменских А. С. Воздействие одностороннего замораживания-оттаивания на бетон. *Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій* : зб. тез міжнар. наук. конф. (м. Одеса, 23-24 квіт. 2019 р.). Одеса, 2019. С. 70–71.

16. Непомящий А. Н., Вировой В. Н., Суханова С. В., Сушицкий Е. Б. Влияние локального замораживания на свойства бетона. *Експлуатація та реконструкція будівель і споруд* : тези доп. III міжнар. конф., м. Одеса, 26-28 вересня 2019 р. Одеса, 2019. С. 111.

17. Непомящий О. М., Вировой В. М., Хоменко А. О., Закорчемна Н. О. Морозостійкість будівельних композитів при односторонньому заморожуванні. *Гідротехнічне і транспортне будівництво* : зб. тез міжнар. наук.-техн. конф. (м. Одеса, 28-29 травня 2020 р.). Одеса, 2020. С. 71-75.

18. Непомящий О. М. Моделирование морозостойкости будівельних композитів при односторонньому заморожуванні. *Моделирование та оптимізація будівельних композитів* : матеріали міжнар. сем., м. Одеса, 3-4 грудня 2020 р. Одеса, 2020. С. 106–110.

19. Непомящий О. М., Вировой В. М., Макарова С. С., Реутська Е. В. Морозостійкість матеріалів в умовах одностороннього заморожування виробів. *Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій* : зб. тез міжнар. наук.-техн. конф. (м. Одеса, 08-09 квітня 2021 р.). Одеса, 2021. С. 74–76.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1 МОРОЗОСТІЙКІСТЬ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	27
1.1 Умови експлуатації будівельних виробів, конструкцій, будівель і споруд.....	28
1.2 Основні механізми морозного руйнування будівельних матеріалів (виробів).....	34
1.3 Фактори, що впливають на морозостійкість будівельних матеріалів.....	43
Висновки за 1-м розділом.....	52
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ХАРАКТЕРИСТИКА ВИКОРИСТАНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	53
2.1 Блок-схема дослідження.....	53
2.2 Характеристики використаних матеріалів.....	55
2.3 Методика проведення експериментів.....	57
2.3.1 Методика ізоляції зразків.....	57
2.3.2 Умови заморожування зразка.....	59
2.3.3 Методи випробувань і контрольовані параметри.....	60
2.3.4 Методи виявлення і фіксації тріщин.....	62
Висновки за 2-м розділом.....	65
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ РОЗВИТКУ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ ОДНОБІЧНОМУ ТА ОБ'ЄМНОМУ ЗАМОРОЖУВАННІ.....	66
3.1 Об'ємне заморожування бетону як капілярно-пористого тіла.....	66
3.2 Роль капілярів при заморожуванні будівельних матеріалів.....	76
3.3 Однобічне заморожування КМБ як капілярно-пористого тіла.....	81
3.4 Роль тріщини в морозостійкості матеріалів.....	84
3.5. Вплив умов заморожування-відтавання на характер розвитку об'ємних деформацій в зразках.....	91

Висновки за 3-м розділом.....	105
РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ УМОВ ЗАМОРОЖУВАННЯ НА ЗМІНУ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ ТА РОЗЧИНУ.....	107
4.1. Вплив умов заморожування на зміну коефіцієнта пошкодженості цементного каменю.....	107
4.2. Вплив умов заморожування на зміну фізичних характеристик цементного каменю.....	115
4.2.1. Вплив умов заморожування на зміну маси та водопоглинання...	115
4.2.2. Вплив умов заморожування на зміну швидкості проходження ультразвуку в зразках.....	118
4.3. Зміна міцності та стійкості цементного каменя при циклічному заморожуванні-відтаванні.....	123
4.4. Вплив умов заморожування на зміну структури розчину.....	126
4.4.1. Вплив умов заморожування на коефіцієнт пошкодженості.....	126
4.5. Вплив умов заморожування на зміну фізичних характеристик зразків з розчину.....	136
4.5.1. Зміна маси та водопоглинання.....	136
4.5.2. Вплив умов заморожування на зміну швидкості проходження ультразвуку в зразках з розчину.....	140
4.6. Вплив умов заморожування на зміну механічних характеристик та морозостійкість розчину.....	145
Висновки за 4-м розділом.....	148
РОЗДІЛ 5 ВПЛИВ УМОВ ЗАМОРОЖУВАННЯ НА ЗМІНУ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНУ.....	150
5.1. Вплив умов заморожування на зміну коефіцієнту пошкодженості бетону.....	151
5.2. Вплив умов заморожування на зміну фізичних характеристик бетону.....	157

5.2.1. Вплив умов заморожування на зміну маси та водопоглинання...	157
5.2.2. Вплив умов заморожування на зміну швидкості проходження ультразвуку в зразках.....	163
5.2.3 Вплив одnobічного заморожування-відтавання на міцність, що визначалась неруйнівним методом.....	168
5.3. Зміна механічних характеристик та стійкість бетону.....	172
Висновки за 5-м розділом.....	177
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	179
Список використаних джерел.....	182
ДОДАТКИ.....	197
Додаток А Акти про впровадження результатів досліджень.....	198
Додаток Б Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	200

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Погодні явища є постійним чинником в життєвому циклі будівельних виробів, конструкцій, будівель та споруд. Будівельні вироби та конструкції відносять до відкритих складних систем, що самоорганізуються. Це передбачає, що протягом всього життєвого циклу такі системи постійно знаходяться під зовнішньою дією навколишнього середовища. Аналіз погодних умов м. Одеси та Одеської області показав, що протягом одного року біля 70 разів температура знижувалась нижче 0°C, що викликає необхідність враховувати здатність матеріалу виробів забезпечувати необхідну морозостійкість.

Існуючі методики оцінки морозостійкості будівельних матеріалів ґрунтуються на всебічному заморожуванні попередньо зволжених зразків. Аналіз умов експлуатації більшості будівельних виробів і конструкцій (огорожувальні конструкції будівель і споруд різного призначення, греблі, облицювання каналів, напірні і безнапірні труби, ЛЕП тощо) показав, що, як правило, зовнішні погодні впливи діють на них однобічно або локально. Можна припустити, що при таких впливах поведінка матеріалів у виробках буде значно відрізнятися від їх поведінки при всебічному заморожуванні. Тому постає завдання аналізу умов зовнішнього впливу на зміну фізико-механічних характеристик цементного каменю, розчинів і бетонів.

Проведений аналіз показав, що практично відсутня науково-технічна інформація щодо впливу умов заморожування на морозостійкість. Зміна умов заморожування істотно змінює формування фронту промерзання, що веде до зміни внутрішнього тепло- і масопереносу, затискання або витіснення газової складової, виникнення та розвитку вологісних і температурних деформацій та ін. Врахування цих факторів дасть змогу більш об'єктивно оцінити вплив погодних умов на безпечне функціонування будівельних виробів, конструкцій, будівель та споруд.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі виробництва будівельних виробів і конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури в рамках держбюджетної теми "Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів" (№ держреєстрації 105U000867).

Мета роботи – врахування способу заморожування зразків при оцінках морозостійкості матеріалу та розробка адекватних рецептурно-технологічних методів підвищення стійкості матеріалів в залежності від виду та умов експлуатації виробів і конструкцій.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі **завдання** досліджень:

- проаналізувати умови експлуатації з метою виявлення найбільш характерних випадків дії погодних умов на будівельні об'єкти різного призначення;
- дослідити розвиток об'ємних деформації в зразках та виробах з урахуванням умов заморожування та відтавання;
- дослідити вплив умов заморожування та відтавання на зміну структури, фізико-механічних характеристик та морозостійкості зразків із цементного каменю;
- проаналізувати вплив умов заморожування та відтавання на зміну структури, фізико-механічних характеристик та морозостійкості зразків із розчину;
- зробити аналіз різних умов впливу заморожування та відтавання на зміну структури бетонних зразків;
- розробити рекомендації з оцінки морозостійкості будівельних матеріалів в залежності від умов експлуатації об'єктів, для яких вони призначені.

Об'єкт досліджень – структура і властивості матеріалів та виробів в умовах об'ємного та одностороннього заморожування.

Предмет досліджень – процеси розвитку об'ємних деформацій в матеріалах та зразках при зміні умов їх заморожування

Методи досліджень. Експериментальні дослідження проводилися з застосуванням комплексу методів згідно з чинними нормативними і загальноприйнятими методиками. Розподіл деформацій при замерзанні вільної води в тріщинах аналізували графоаналітичним методом. Для моделювання одностороннього заморожування була розроблена спеціальна методика. Для виявлення і фіксації технологічних та експлуатаційних тріщин застосовувалися спеціально розроблені методи. Обробка отриманих даних була проведена за допомогою обчислювальних програм.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- вперше теоретично обґрунтовано та експериментально доведено, що зміна умов заморожування веде до зміни внутрішнього тепло- та масопереносу в матеріалі, що викликає зміну та перерозподіл об'ємних деформацій по всьому перетину виробу;
- вперше показаний механізм формування фронтів промерзання та відтавання бетону в конструкціях в залежності від умов його заморожування та відтавання.

Подальший розвиток отримали:

- закономірності розвитку пошкодженості цементного каменю, розчину та бетону в залежності від умов заморожування;
- особливості зміни фізико-механічних властивостей цементного каменю, розчину та бетону при зміні умов заморожування та відтавання.

Практичне значення одержаних результатів. З урахуванням умов заморожування запропоновані кількісні методи прогнозування розвитку знакозмінних об'ємних деформацій по об'єму зразків.

Визначена роль умов заморожування на зміну структури, властивостей та морозостійкості цементного каменю, розчину та бетону.

Розроблені рекомендації з оцінки морозостійкості будівельних матеріалів в залежності від умов експлуатації об'єктів, для яких вони призначені.

Результати проведених досліджень були впроваджені до конструкторської практики ТОВ "ЕЛЕМЕНТ" (м. Одеса) при проектуванні хвилевідбійників та лотків.

Окремі розділи досліджень використані в навчальному процесі в циклах лекцій та практичних роботах за дисциплінами, пов'язаними з технологією, структуроутворенням та експлуатацією будівельних матеріалів та виробів, що дозволило більш широко розкрити взаємозв'язок між матеріалами та виробами та розширити варіативність при прийнятті раціональних рецептурно-технологічних рішень. Теоретичні та експериментальні дослідження використовуються в навчальному процесі при підготовці здобувачів за галуззю знань 19 "Архітектура та будівництво" спеціальності 192 "Будівництво та цивільна інженерія". В сукупності це призводить до підвищення та поглиблення знань здобувачів першого (бакалаврського) рівня.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану проблеми, формулюванні мети та завдань дисертаційних досліджень, в проведенні аналітичних та експериментальних робіт, аналізі отриманих результатів. Експериментальна частина дисертаційної роботи виконувалась у лабораторії кафедри виробництва будівельних виробів та конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури.

Апробація дисертаційної роботи. Основні положення і результати досліджень, виконаних в дисертаційній роботі, були представлені на таких міжнародних конференціях та семінарах: міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті" (м. Харків, 2017 р.), міжнародній конференції "Експлуатація та реконструкція будівель і споруд" (м. Одеса, 2017 р., 2019 р.), науково-практичній конференції "Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси" (м. Одеса, 2018 р.), міжнародному семінарі "Моделювання та оптимізація будівельних композитів" (м. Одеса, 2018 р., 2019 р., 2020 р.), міжнародних науково-технічних конференціях "Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій" (м. Одеса,

2018 р., 2019 р., 2021 р.), "Гідротехнічне і транспортне будівництво" (м. Одеса, 2020 р.).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковані у 19 наукових працях, з яких 6 статей у фахових виданнях України, 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, 11 тез доповідей у збірниках наукових конференцій та семінарів.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 204 сторінки, з них 125 сторінок основної частини, 57 рисунків, 26 таблиць, список використаних джерел з 164 найменувань на 15 сторінках, а також додатки на 8 сторінках.

РОЗДІЛ 1

МОРОЗОСТІЙКІСТЬ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Морозостійкість – це здатність матеріалів в зволоженому стані витримувати без руйнування багаторазове заморожування, що чергується з розморожуванням. До основної причини руйнування матеріалу під дією низьких температур відносять розширення води при замерзанні в капілярно-поровому просторі матеріалу. Морозостійкість залежить головним чином від капілярно-пористої структури матеріалу: чим вище відносний об'єм пор, доступних для проникнення води, тим нижче морозостійкість.

Діючий ДСТУ Б В.2.7-48-96 вимагає проводити випробування в хімічно агресивному середовищі і враховувати сценарій експлуатації [55]. При цьому до морозостійких відносять бетони, міцність яких не знижується більш ніж на 5 % після нормованих циклів заморожування-відтавання.

Існують різні гіпотези, які пояснюють механізми морозного руйнування бетону. В основі всіх теорій лежить знання, що обсяг льоду більший, ніж той, що займає вода, яка поступово змінює внутрішню структуру зволоженого матеріалу. Однак в реальності процес набагато складніший, тому що мікроскопічні пори в бетоні не дозволяють значній частині води почати процес кристалізації навіть при мінусовій температурі.

Важливим, завжди актуальним і економічно обґрунтованим завданням будівництва є забезпечення проектних показників будівельних конструкцій з врахуванням їх експлуатації в умовах несприятливого впливу навколишнього середовища. До таких впливів фахівці відносять багаторазове заморожування і відтавання бетонних та залізобетонних виробів.

При переході води з рідкого стану в твердий (лід) щільність різко, стрибкоподібно змінюється приблизно на 9%. Щільність дистильованої води за температури 0°C дорівнює 0,99987 кг/м³, а льоду, що утворився з тієї ж води за температури 0°C, дорівнює 0,9167 кг/м³. Зі зниженням температури щільність чистого льоду дещо зростає і за температури -20°C досягає 0,92 кг/м³.

1.1 Умови експлуатації будівельних виробів, конструкцій, будівель і споруд

До типових конструкцій, що зазнають циклічний вплив середовища при експлуатації, можна віднести:

- зовнішні огорожувальні конструкції житлових, громадських і промислових будівель і споруд;
- покриття проїзної частини доріг;
- залізничні залізобетонні шпали, опори ЛЕП і платформи;
- прогонові будови та опори мостів і шляхопроводів;
- бордюрний камінь, тротуарні плити, конструкції гідротехнічних систем і меліоративних об'єктів і т.п.

Ефективність будівельних матеріалів і конструкцій в значній мірі визначається їх здатністю зберігати нормовані показники якості у запланований проміжок часу експлуатації [3, 5, 6, 7, 8, 9, 78, 98, 139, 140, 151, 159]. Збереження нормованих показників якості передбачає, що матеріал і конструкції здатні зберігати та (або) трансформувати закладені в ньому структурні властивості в різних несприятливих експлуатаційних умовах [3, 6, 8, 14, 15, 16, 36, 37, 38 47, 68, 75, 96, 110, 129, 139, 147, 156, 159]. До несприятливих експлуатаційних умов відносяться багаторазові зволоження і висушування, нагрівання та охолодження, заморожування і відтавання, хімічний вплив рідких і газоподібних агресивних середовищ, ненормовані статичні й динамічні навантаження та ін. [5, 8, 32, 33, 37, 38, 40, 42, 49, 51, 52, 65, 67, 73, 76, 80, 85, 93, 116, 118, 126, 129, 138, 141, 146, 150, 158].

Знакозмінні температурно-вологісні впливи розхитують структуру матеріалу, викликають необоротне накопичення залишкових деформацій, що на фоні агресивного хімічного впливу веде до зниження фізико-механічних і захисних властивостей бетонів [1, 2, 5, 6, 15, 22, 25, 38, 39, 55, 73, 82, 87, 94, 97, 115, 117, 132, 141, 143, 151, 152, 159]. В результаті, нормовані показники якості

зменшуються до критичного значення, що веде до передчасного виходу будівельних конструкцій з ладу.

Для більшості районів України температура повітря менша за 0°C спостерігається в осінньо-зимовий період практично кожен рік. Шість місяців на рік конструкції будівель і споруд зазнають впливу температур нижче ніж 0°C . Кліматична зона України відповідає середньоєвропейській кліматичній зоні, що передбачає зниження середньої від'ємної температури в зимовий період до $T = -20^{\circ}\text{C}$. Для півдня України і, зокрема, для Одеської області характерне зниження температури в окремі осінньо-зимові періоди до $T = -20...-30^{\circ}\text{C}$. Багаторічні спостереження показали, що перехід через $T = 0^{\circ}\text{C}$ може відбуватися починаючи з жовтня і закінчуватися в першій половині квітня [81].

Добовий аналіз коливання температур в осінньо-зимовий період дозволив зробити висновок, що середньодобова температура не відображає об'єктивного температурного впливу на будівельні об'єкти. Так, при середньодобовій температурі в другій половині листопада $T = +2^{\circ}\text{C}$, температура вдень досягає $T = +5^{\circ}\text{C}$, а в нічний час може знижуватися до $T = -3...-5^{\circ}\text{C}$. Аналогічна картина добового коливання від $T = +3...+5^{\circ}\text{C}$ в денний час до $T = -5...-10^{\circ}\text{C}$ вночі спостерігається й в зимові місяці.

В даному випадку мова йде не про градієнти температури, а про факт переходу температури від плюсових до мінусових значень (факт переходу через $T = 0^{\circ}\text{C}$).

Акцентування уваги на факті переходу через $T = 0^{\circ}\text{C}$ пов'язано з тим, що за цієї температури відбувається зміна агрегатного стану води. При перетворенні води на лід відбувається збільшення об'єму до 9%, що на думку фахівців [39, 44, 119, 120] є однією з важливих причин несприятливого фізичного впливу на капілярно-пористу структуру будівельних матеріалів.

Аналіз кліматичних умов в осінньо-зимовий період показав, що в цей час відбувається випадіння опадів у вигляді дощу, мокрого снігу та снігу [81]. Періодично випадають густі тумани. Це викликає зволоження будівельних конструкцій. Крім того, в денний час за плюсової температури можливе

зволоження конструкцій за рахунок танення льоду і снігу. У нічний час за мінусових температур відбувається замерзання води, що проникла в поровий простір матеріалу будівельних виробів і конструкцій. Таким чином, тільки протягом одного року може проходити від 50 до 120 циклів зволоження та заморожування будівельних конструкцій різного виду і призначення.

В середньому за рік протягом одного місяця – 10 днів з дощем, 5 днів з туманами. В осінньо-зимовий період – 17 днів з морозами, 7 днів зі снігом. Кліматичні дані для розрахунку було взято як середнє значення параметра за п'ять останніх десятиліть.

Аналіз кліматичних умов півдня України показав, що на протязі тільки одного року може відбутися більше 70 випадків переходу температури від від'ємних до плюсових значень.

Проведений аналіз кліматичних умов експлуатації будівельних конструкцій показує, що їх циклічне зволоження з подальшим заморожуванням в осінньо-зимовий період є об'єктивною характеристикою температурно-вологісного впливу навколишнього середовища на матеріал будівельних виробів і конструкцій. Тому при проектуванні складу бетону для конструкцій, експлуатація яких передбачається в умовах циклічного заморожування і відтавання, слід передбачати заходи щодо забезпечення їх необхідної морозостійкості.

На підставі проведеного літературного аналізу видно, що на всіх об'єктах капітального будівництва, призначених для різних цілей, споруджених в помірних і суворих кліматичних умовах, морозна деструкція є одним з основних видів руйнування цих об'єктів.

Багаторічні та всебічні дослідження фахівців вказують на те, що до основних причин зниження морозостійкості будівельних матеріалів, як капілярно-пористих тіл, слід віднести критичні деформації та напруження, пов'язані з замерзанням води в їх порах і капілярах.

Усунення дефектів від морозної деструкції, що з'являються в процесі експлуатації, вимагає великого обсягу ремонтно-відновлювальних робіт або повної заміни окремих конструкцій. Всі рішення щодо запобігання морозного

руйнування бетону або його істотного уповільнення є дороговартісними, трудомісткими і не дають належного ефекту [155, 158].

Обстеження споруд, виконаних з бетону і залізобетону, показує, що бетон часто руйнується задовго до кінця проектного терміну експлуатації. При цьому в більшості випадків руйнування бетону викликається морозною деструкцією, тобто бетон не витримує тієї кількості циклів поперемінного заморожування і відтавання, яку йому доводиться переносити під час експлуатації споруди.

Таке руйнування може відбуватися з двох причин:

- при правильному призначенні нормативної марки за морозостійкістю бетон споруд в дійсності не мав необхідної морозостійкості;
- нормативна морозостійкість була призначена неправильно [155].

Результати випробування КБМ і аналіз технічної документації показують, що в переважній більшості випадків матеріал бетонних конструкцій споруд відповідає проектній марці за морозостійкістю. Проте більшість споруд руйнуються від морозної деструкції. Саме тому в багатьох випадках марка бетону за морозостійкістю призначається необґрунтовано, а частіше завищена. При призначенні марки бетонів конструкцій за морозостійкістю береться до уваги в основному мінімальна температура найхолоднішого місяця району будівництва [78, 146, 155]. В той же час загального принципу (методики) призначення нормативної морозостійкості немає. У зв'язку з цим до бетонів одних й тих самих конструкцій нормативними документами пред'являються різні вимоги за морозостійкістю. У більшості з них при призначенні марки бетону за морозостійкістю не враховуються важливі чинники, що впливають на кількість циклів заморожування і відтавання.

Таким чином, існуючі методики призначення нормативної морозостійкості не в повному обсязі враховують реальні умови експлуатації споруд. Виходячи з вищевикладеного зрозуміло чому бетони, що задовольняють проектним вимогам за морозостійкістю, вичерпують свою довговічність, і споруди починають руйнуватися задовго до закінчення нормативного терміну служби. Бетони багатьох споруд і конструкцій насправді зазнають дії більшої (іноді в декілька

десятків разів) кількості циклів заморожування і відтавання, ніж це передбачається нормами проектування, отже, в нормативних документах занижена проектна марка за морозостійкістю порівняно з необхідною в реальних умовах [114, 121, 165].

Багатопараметричне проектування бетонних розчинів розвивається, передусім у напрямку врахування властивостей, що характеризують його довговічність. Ще Дафф А. Абрамсом було відзначено, що при проектуванні складів бетону мають бути забезпечені разом з міцністю "довговічність і дешевизна". Відповідно до представлень сучасної кваліметрії [47, 140, 157, 159] довговічність матеріалів і виробів характеризується їх здатністю зберігати працездатність до деякого граничного стану. Працездатність бетону лімітується залежно від умов служби в конструкціях і спорудах нормативними показниками відповідних властивостей. Як правило, для бетону складно вимірювати довговічність терміном експлуатації, що прийнято для ряду інших матеріалів і виробів. Це пояснюється недостатньою вивченістю закономірностей розвитку процесів в часі, що відбуваються у бетоні при комплексній дії чинників довкілля, а також складністю їх моделювання.

Існуючі методики оцінки морозостійкості будівельних матеріалів ґрунтуються на всебічному заморожуванні попередньо зволжених зразків, той же час, як показав аналіз умов експлуатації, значна кількість виробів та конструкцій сприймає зовнішні кліматичні впливи однобічно. Це означає, що в матеріалі конструкції одночасно співіснують зони з від'ємною температурою та зони з плюсовою температурою (наприклад, палі та опори мостів, зовнішні огорожувальні елементи, греблі, облицювання каналів тощо). Можна припустити, що в таких випадках внутрішні процеси тепло- та масопереносу будуть суттєво відрізнятися порівняно з об'ємним (всебічним) заморожуванням, що має відобразитись на морозостійкості матеріалів. [63, 80]

Результати аналізу погодних умов в Одеській області показав, що за один рік відбувається більше 70 циклів переходу температури через 0 °C (рис.1.1). Це означає, що в осінньо-зимовий період може відбутися більш ніж 70 циклів

заморожування і відтавання матеріалу конструкцій, будівель та споруд, що свідчить про актуальність завдання із забезпечення їх морозостійкості.

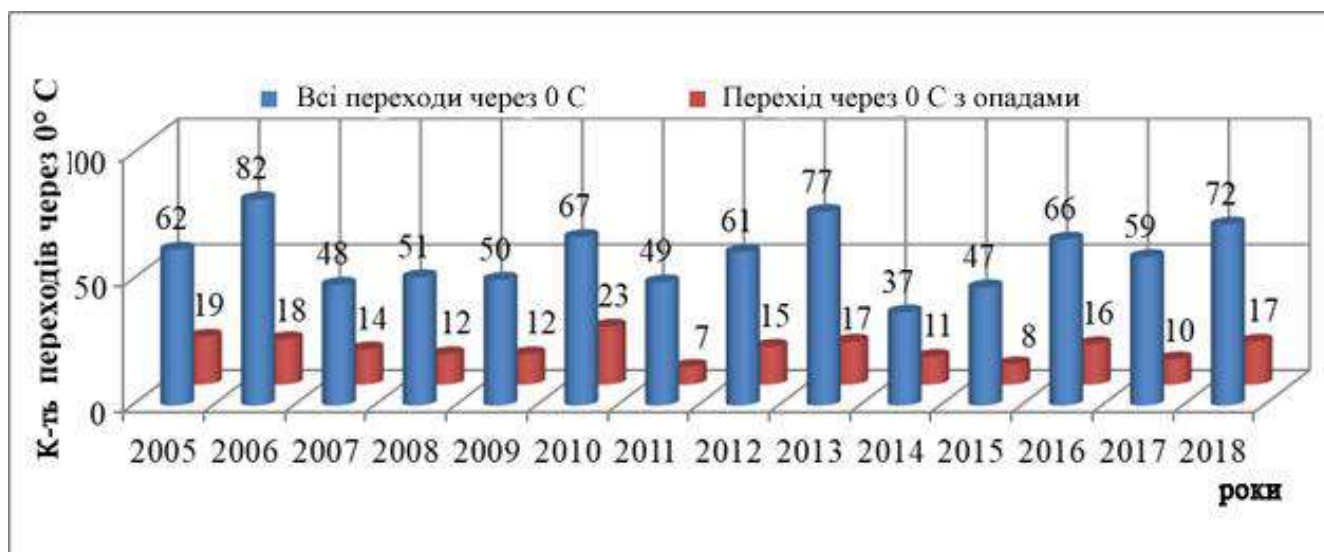


Рис.1.1. Кількість переходів температури через 0°C в різні роки в Одеській області

Проведений аналіз основних причин зниження морозостійкості показав, що практично відсутня науково-технічна інформація щодо впливу умов заморожування виробів (зразків) на здатність матеріалу сприймати без руйнування розвиток деформацій при збільшенні об'єму замерзлої води. Зміна умов заморожування істотно змінює формування фронту промерзання, що веде до зміни внутрішнього тепло- і масопереносу, затискання або витіснення газової складової, виникнення і розвитку вологісних і температурних деформацій та ін. Це є підставою припускати, що зміна умов заморожування зразків (всебічне або однобічне) має призвести до зміни морозостійкості будівельних матеріалів. Таким чином, врахування способу заморожування зразків дозволить об'єктивніше оцінити морозостійкість матеріалу і розробити адекватні рецептурно-технологічні методи підвищення стійкості матеріалів в залежності від виду та умов експлуатації виробів і конструкцій.

Можна припустити, що за різних типів впливів й поведінка матеріалів у виробках буде значно відрізнятися. Для більш об'єктивної оцінки морозостійкості,

актуальною є задача аналізу умов зовнішнього впливу від'ємних температур на зміну фізико-механічних характеристик розчинів і бетонів.

Проведений аналіз дозволяє зробити такі висновки:

1. Аналіз кліматичних умов показав, що для південних районів України в осінньо-зимовий період можлива зміна температури з плюсових на мінусові значення від 50 до 120 циклів. Таким чином, протягом одного року будівельні конструкції можуть зазнавати до 120 циклів заморожування і відтавання, що робить задачу забезпечення необхідної морозостійкості важливою та актуальною.

2. Будівельні конструкції житлових, громадських і промислових будівель і споруд при експлуатації піддаються дії зволоження та багаторазових циклів заморожування та відтавання, що в значній мірі впливає на скорочення часу їх активної експлуатації.

3. Проведений аналіз основних причин зниження морозостійкості показав, що практично відсутня науково-технічна інформація щодо впливу умов заморожування виробів (зразків) на здатність матеріалу сприймати розвиток деформацій при збільшенні об'єму замерзлої води без руйнування.

1.2 Основні механізми морозного руйнування будівельних матеріалів (виробів)

Механізми морозного руйнування будівельних матеріалів ґрунтуються на певних гіпотезах. Відомо, що об'єм льоду на 9% більший за об'єм води [39, 44, 119, 120] і через це всередині матеріалу утворюється напруга, яка може бути руйнівною для конструкції.

Це лягло в основу основних гіпотез, які пояснюють виникнення напруг, що виникають в будівельних матеріалах, як капілярно-пористих тілах, в результаті утворення льоду.

Гіпотеза безпосередньої дії льоду, що кристалізується, на стінки пор. За розрахунками деяких вчених, тиск льоду при замерзанні води складає близько 12 МПа, тоді як міцність бетону на розрив рідко перевищує 7 МПа, тому бетон

руйнується там, де утворився лід. Руйнування зростає з кожним циклом заморожування та відтавання [21,32,48,64].

Гіпотеза термічної несумісності компонентів бетону полягає в тому, що заповнювачі і цементний камінь мають різні коефіцієнти термічного розширення. За мінусових температур термічна несумісність компонентів різко посилюється, оскільки коефіцієнт термічного розширення льоду в 3-7 разів більше ніж бетону [12,17,21,30].

Гідравлічний тиск. Вперше цю теорію було представлено М.Сумгіним [138], але для граніту та твердих гірських порід в районах Амурської та Забайкальської області в Росії. Внаслідок того, що щільність води відрізняється під час переходу фаз "вода - лід", відбувається збільшення об'єму приблизно на 9%, тобто еквівалентний об'єм води має бути витіснений. Якщо у безпосередній близькості від місця утворення льоду немає відповідного простору (вільні від води пори, поверхня) для води, що витісняється, то виникає внутрішній тиск, який, згідно Т.С. Пауерсу, позначається як гідравлічний тиск [161,162].

Величина гідравлічного тиску залежить, в першу чергу, від довжини шляху, яким проходить вода, що витісняється, до найближчого вільного від води простору для розширення. Ушкодження від морозу відбувається тільки тоді, коли гідравлічний тиск перевищує міцність бетону на розтягування. Виходячи з цього, Т.С. Пауерс пояснює позитивний вплив пороутворювачів тим, що вони забезпечують додатковий простір для розширення. Він розрахував, яким може бути максимальний шлях від місця утворення льоду до межі простору для розширення (чинник відстані) для того, щоб гідравлічний тиск не перевищив міцність бетону на розтягування. Гідравлічний тиск залежить також від кількості замерзаючої води та від швидкості охолодження при замерзанні [155].

Високий гідравлічний тиск виникає тоді, коли бетон має витягнуту систему капілярних пор та високу міру водонасичення, а швидкість утворення льоду висока. Проте гідравлічний тиск може привести до ушкоджень й у тому випадку, коли вміст води в порах менше 91%. Пауерс Т.С. пояснює це тим, що рідина спочатку замерзає у більших порах. Коли починається процес замерзання рідини в

дрібніших порах, то витіснення води через лід, що вже утворився у великих порах, ускладнене. При повному блокуванні води, що витісняється, гідравлічний тиск теоретично може досягати 200 Н/мм^2 . Гідравлічний тиск – один з найважливіших чинників на мікроскопічному рівні, що обумовлюють появу ушкоджень під дією морозу [155].

Також дану теорію підтримували В.М. Москвін, М.М. Капкін, Б.М. Мазур і А.М. Підвальний, які стверджують, що на стінки пор тисне не сам лід, а вода, на яку передається тиск льоду. На користь більшої коректності другої гіпотези говорить той факт, що вода, яка заповнює капілярні пори, не може, як правило, повністю перетворитися на лід через відсутність необхідного місця і тому передає тиск від льоду на стінки пор. Але гіпотеза також не може пояснити ряд явищ, що спостерігаються при дії мінусових температур на бетон [94, 95, 115, 117, 118, 151, 153].

Проте така термічна напруга відіграє важливу роль лише в ненасиченому вологою бетоні. У наш час проводиться безліч випробувань бетону на дію мінусових температур. На основі випробувань було з'ясовано, що при збільшенні швидкості заморожування бетону деструкція бетону відповідно прискорюється, але тиск льоду на стінки пор не збільшується. Цей факт не може пояснити згадана вище гіпотеза.

Також встановлено, що руйнування бетону при дії мінусових температур можливо і при заповненні водою менш ніж на 90% і це не є рідкісним фактом.

Капілярний ефект. Не усі пошкодження при дії морозу слід пояснювати витісненням води із зони замерзання. Причиною такого явища є так званий капілярний ефект, який обумовлений залежністю точки замерзання від розміру пор. Під час процесу замерзання вода спочатку замерзає у великих капілярних порах, тоді як в дрібніших порах гелів вона залишається в рідкому стані. Оскільки тиск пари над водою вищий, ніж над льодом, то виникає термодинамічний невірноважений стан, який створює рушійну силу для переміщення води з дрібніших у більші пори або на покриту льодом поверхню бетону.

Разом з гідравлічним тиском, капілярний ефект є другою важливою причиною ушкоджень на мікроскопічному рівні при дії морозу [78, 155].

Зміна морозостійкості при зміні геометричних характеристик несучільностей. У роботах [25, 55] запропонована модель структури композиційних будівельних матеріалів, яка включає в себе технологічні тріщини та внутрішні поверхні розділу. Принципова відмінність внутрішніх поверхонь розділу (ВПР) від технологічних тріщин (ТТ) полягає в тому, що у ВПР відсутня відмітна ознака тріщини – гирло.

В силу того, що ТТ і ВПР присутні як на поверхні зразків, так і в їх об'ємі, то логічно припустити, що в першу чергу вода буде замерзати в поверхневих тріщинах. Зміна температури зразка відбувається з його поверхні, формуючи фронт промерзання [39, 78]. Фазові перетворення води за часом можуть не збігатися зі швидкістю просування температурного фронту. Це пов'язано з тим, що зі збільшенням лужності порової рідини в міру поглиблення в об'єм матеріалу температура її замерзання знижується. Крім того, для структур, що складаються з дискретних блоків, що взаємодіють через ВПР, коефіцієнти дифузійного масопереносу можуть змінюватися на порядки. Тому в таких випадках доцільно говорити не про фронт, як досить рівномірну лінію, що формується під дією постійних градієнтів температури, а про локальний ("струмковий") механізм тепло- і масопереносу.

Аналіз [26, 28, 57, 58, 59, 60, 61, 62] показав, що при проходженні циклів заморожування та відтавання, в об'ємі ТТ відбувається зміна їх геометричних характеристик. При цьому утворюються нові елементи тріщини на берегах початкової тріщини в зоні границі розділу "лід-вода", в зонах зміни напрямку траєкторії криволінійної тріщини та проходить збільшення довжини початкової тріщини.

Збільшення ширини розкриття викликає збільшення об'єму ділянки тріщини, заповненої зв'язаною водою. Зниження тиску в об'ємі ділянки тріщини, заповненої зв'язаною водою, веде до спонтанного перерозподілу форм зв'язку води. Можна припустити, що за рахунок зниження парціального тиску, частина

поліадсорбційної води буде переходити у вільний стан. При цьому вільна вода буде акумулюватися в ділянці тріщини з максимальною шириною розкриття – на межі з льодом. Крім того, взявши до уваги, що матеріал, в якому знаходиться тріщина, є заповненою водою капілярно-пористою системою, можна зробити висновок про підсос частини капілярної рідини в об'єм тріщини.

Осмос. Рідина в порах цементного каменю містить розчинені речовини, які поступають з матриці цементного каменю та з застосовуваних розморожуючих солей [155]. При замерзанні розбавленого розчину до евтектичної точки виділяються тільки кристали льоду. Паралельно з цим підвищується концентрація залишкового розчину. Оскільки процес замерзання залежить від розміру пор, то це призводить до різних концентрацій розчину. В той час поки незамерзлий розчин в дрібніших порах має початкову концентрацію, концентрація розчину у більших порах підвищується внаслідок замерзання, що почалося. Цей перепад концентрацій призводить до процесу дифузії, яка протікає в тому ж напрямку, що і дифузія, обумовлена перепадом тиску пари (рідина рухається від дрібних пор до великих). Таким чином, капілярний ефект, зокрема при застосуванні розморожуючих солей, може посилюватися виникаючим перепадом концентрацій парової рідини. Осмотичний тиск в якості первинної причини ушкоджень може бути виключений [155].

Термодинамічна модель. У термодинамічній моделі враховується вплив поверхневих сил на ушкодження під дією морозу. При створенні моделі виходили з того, що разом з шаром води, що адсорбувалась, на поверхні часток за відповідної температури замерзає також розчин в дрібних порах гелів. Внаслідок створення нової поверхні розділу, тонкого шару води і кристалів, при замерзанні виникає додаткова поверхнева напруга.

Тиски, обумовлені цією поверхневою напругою, тим вище, чим менше гідравлічний радіус пор. Звідси витікають відмінності тисків між заповненими льодом порами різної величини, які можуть привести до значної напруги в мікроструктурі цементного каменю.

Якщо виходити з точки замерзання найдрібніших пор, то максимальні перепади тисків можуть скласти до 37 Н/мм^2 . Вплив цих перепадів тисків залежить значною мірою від швидкості охолодження. При невеликій швидкості охолодження відбувається стискання винятково в дрібніших порах, при швидкому охолодженні надмірний тиск виникає і у більших порах.

Термодинамічна модель узгоджується з рядом ефектів, що виникають при дії морозу на цементний камінь. Внаслідок специфіки пор цементного каменю (більшість пор – це гелієві й капілярні пори) слід виходити з того, що описані процеси ушкодження бетону при дії морозу мають істотний вплив.

Тиск кристалізації. За рахунок ефектів кристалізації можуть виникнути такі тиски:

- гідростатичний тиск кристалізації;
- лінійний тиск зростання кристалів;
- тиск гідратації (точніше: тиск кристалізації внаслідок гідратації).

Під гідростатичним тиском кристалізації розуміють тиск, який виникає, якщо об'єм утвореного кристала і залишкового розчину більший, ніж об'єм перенасиченого розчину. Під дією морозу та розморожуючої солі тиск льоду, про дію якого вже говорилося і яка є гідростатичним тиском кристалізації, є визначальний.

Лінійний тиск зростання кристалів – це результат того, що кристали, у яких напрям зростання стає виключно переважним, за певних умов можуть продовжувати зростання навіть долаючи опір. Кристали, що утворилися в пористому просторі цементного каменю, можуть таким чином при відповідному зростанні чинити тиск на протилежні стінки пор.

Під тиском гідратації слід розуміти тиск, який може виникнути, коли безводна фаза або фаза з невеликим вмістом води при збільшенні об'єму переходить у фазу з великим вмістом води.

Тиск гідратації не впливає на руйнування структури бетону внаслідок зростання кристалів льоду або можливого утворення кристалів розморожуючої солі [69,73,155, 164].

Неоднакові коефіцієнти температурного розширення. При великих різницях температур, внаслідок відмінностей в коефіцієнтах температурного розширення, виникає напруга, яка знаходиться в межах міцності бетону на розтягування. Наприклад, при різниці температур 40°C , може виникнути напруга розтягування $> 6 \text{ Н/мм}^2$.

Проте експериментального доказу дії цього механізму руйнування у бетоні не було отримано, тому відносно впливу неоднакових коефіцієнтів температурного розширення на ушкодження матеріалу існують різні думки. Появу ушкоджень бетону внаслідок різних коефіцієнтів температурного розширення компонентів у бетонів, виготовлених відповідно до норм, може бути виключено [39, 40, 118, 119].

Напруга внаслідок різного температурного розширення цементного каменю і льоду може посилюватися додатково процесами, що протікають на мікроскопічному рівні.

Спочатку охолодження, що йде за утворенням льоду, призводить до того, що лід стискається набагато сильніше, ніж цементний камінь. При триваліших періодах замерзання вода з невеликих пор може проникати у виникаючий проміжний простір. При нагріванні системи лід розширюється сильніше, ніж цементний камінь, внаслідок чого створюється значна напруга розтягування на стінках пор.

Різні коефіцієнти температурного розширення льоду і цементного каменю, вочевидь, грають істотну роль в реальних ушкодженнях при дії морозу. Дослідження в низькотемпературному діапазоні, проведені за допомогою растрового електронного мікроскопа, показують, що виникаюча напруга може викликати ушкодження структури.

Пошарове замерзання. Модель пошарового замерзання була спочатку складена для замерзання бетону у присутності розморожуючої солі. При застосуванні розморожуючих солей має місце ефект сольового градієнта, який призводить до того, що в поверхневих зонах бетону точка замерзання знижується сильніше, ніж в глибших зонах. З іншого боку, при замерзанні найнижчі

температури спостерігаються спочатку на поверхні бетону, тоді як внутрішні зони охолоджуються повільно. Взаємодія перепадів концентрації солі та температури може привести до того, що утворення льоду відбувається спочатку на поверхні бетону і у внутрішній зоні, тоді як проміжний шар залишається незамерзлим. Якщо при подальшому охолодженні замерзає і цей проміжний шар, то це призводить до відшарування поверхневого шару. Пошарове замерзання бетону може мати місце і при дії тільки морозу. В даному випадку причиною цього явища, разом із вже згаданим перепадом температур, може бути та обставина, що внаслідок неоднорідності бетону, обумовленої процесом його приготування, властивості бетону, відповідальні за ушкодження (водоцементне відношення, пористість, міцність, модуль пружності, коефіцієнт температурного розширення та ін.) змінюються при переході від внутрішньої зони до поверхні [154].

В свій час Сумгін М.І. запропонував та аналізував гіпотезу для ґрунтів вічної мерзлоти про існування ефекту "фронт промерзання". В цій гіпотезі описаний процес, який відбувається при всебічному заморожуванні, де формується своєрідний "фронт промерзання", що сприяє витісненню вільної води в глибинні шари матеріалу [138].

Історично так склалося, що подібний механізм витіснення води був прийнятий як основний при описанні процесів, що відбуваються в окремому капілярі. На цьому базується гіпотеза зниження морозостійкості будівельних матеріалів і розробляються рецептурно-технологічні заходи щодо створення так званої резервної пористості для стоку води, що витісняється, при її замерзанні в об'ємі капілярів.

Дані багатьох дослідників свідчать, що при замерзанні насиченого водою зразка збільшується його об'єм. У випадку, якщо замерзає тільки частина виробу (зразка, конструкції), об'ємні зміни при замерзанні будуть відбуватися тільки в зоні морозу. Це викликає неузгодженість між об'єктивними умовами експлуатації виробів і конструкцій та між діючими методами оцінки морозостійкості матеріалів, з яких виготовлені ці вироби та конструкції. Задля дослідження даної

неузгодженості було поставлене завдання – оцінити вплив умов заморожування на характер розвитку об’ємних інтегральних деформацій в будівельних виробках.

Аналіз літератури показав, що інформація про розподіл деформацій та напруг в будівельних виробках та конструкціях при однобічній дії від’ємних (мінусових) температур відсутня. Однобічне замерзання повинне привести до зміни міграції вологи, процесів перерозподілу деформацій не тільки в самому матеріалі, але і на рівні виробу, що має відобразитись на морозостійкості матеріалу. Це також ставить завдання аналізу процесів, що протікають при однобічному та локальному заморожуванні виробів для цілеспрямованої розробки методів забезпечення нормативної морозостійкості матеріалу.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновки:

1. До основної причини зниження морозостійкості насичених водою бетонів слід віднести збільшення об’єму рідкої фази при її замерзанні в незаповненому твердою частиною просторі бетону.

2. Запропоновані гіпотези морозного руйнування бетону як капілярно-пористого тіла описують явища і процеси, що відбуваються в порах і капілярах різного розміру при замерзанні в них води (порової рідини). Аналіз показав, що описання закінчуються, як правило, моментом утворення в структурі мікротріщин.

3. Наявність в структурі будівельних матеріалів технологічних тріщин ставить завдання аналізу їх впливу на процеси, які відбуваються при заморожуванні насичених водою бетонів. Для цього необхідно запропонувати модель технологічної тріщини і проаналізувати явища, що протікають в тріщині при замерзанні в її об’ємі води, умови можливого укрупнення тріщин і зміну загальної пошкодженості матеріалу при багаторазовому заморожуванні та відтаванні, що має вплинути на морозостійкість бетону і, як підсумок, запропонувати методи зміни початкового пошкодження, яка визначає подальший опір знакозмінним морозним навантаженням.

4. Проведений аналіз літератури не дозволив виявити вплив зміни умов заморожування на зміну структури та морозостійкість значної кількості

будівельних конструкцій, які при експлуатації сприймають однобічну дію навколишнього середовища.

1.3 Фактори, що впливають на морозостійкість будівельних матеріалів

Класифікація основних чинників, що впливають на морозостійкість, запропонована І.Т. Шестоперовим [150,151, 152].

Ці чинники можна поєднати в групи, що визначають міцність бетону, величину капілярної пористості, об'єм залученого повітря, склад цементного каменю і якість контактного шару.

Приведена класифікація марок морозостійкості та рекомендації відносяться до роботи матеріалу в температурному діапазоні $-18...-20^{\circ}\text{C}$. Так само акцентувалася увага на те, що за температуру нуля слід приймати температуру, за якої вода замерзатиме в капілярах тільки певного діаметру. Отже таких "нулів" буде стільки, скільки є капілярів різного діаметру. З цього можна зробити висновок, що величезну роль грає оточуюче середовище, в якому працює ця конструкція.

Ряд робіт було присвячено тому, що важливим чинником, який впливає на стійкість конструкції до морозного руйнування, є кліматичні умови, в яких працює ця конструкція. Вже в 1915 році Ількевич К.Я. [65] писав: "Морозостійкість матеріалів для кожної місцевості має бути своя". Деякі конструкції за одну добу можуть проходити до 5 циклів заморожування та відтавання.

Рекомендації даються в загальному вигляді з урахуванням того, що в кожному випадку будуть використані оптимальні суміші цементу, необхідні добавки, вибрана належна технологія робіт і створені умови, необхідні для процесів твердіння.

Догляд за бетоном так само є важливим фактором в опорі матеріалу морозному руйнуванню. Ушкодження, отримані повною або частковою

відсутністю догляду на ранній стадії утворення структури, ведуть до погіршення властивостей матеріалу [164,165]. Це обумовлено тим, що структура на стадії зародження (утворення систем типу "кластер в кластері") крихка і знаходиться в трансформації. Будь-яка механічна або хімічна зовнішня дія в цей період відображається на характеристиках (повторна вібрація, вібропресування, та ін.). Не варто виключати роль адаптаційної здатності бетонів. Бетон є одним із небагатьох техногенних будівельних матеріалів, що мають в структурі такі неіндиферентні до зовнішнього середовища компоненти, як клінкерні, шлакові, зольні та інші релікти, які можна розглядати як резервні джерела процесів гідратаційного структуроутворення [155].

Умови і тривалість твердіння зразків (цементів) мають одне з вирішальних значень в створенні найбільш довговічних штучних кам'яних матеріалів. Таким чином, умови пропарювання зразків є вирішальними при визначенні їх стійкості. Усі зразки, що твердіють на повітрі, вологість якого недостатня, різко знижують морозостійкість [88, 89, 90, 91, 92].

Якість менш морозостійкого початкового портландцементу відповідним чином позначається і на морозостійкості шлакопортландцементів.

Поєднання якості клінкеру і шлаку (незалежно від того, кислий він або лужний) є одним з визначальних чинників при їх виборі для виготовлення шлакопортландцементів, стійких в умовах фізичної (морозної) агресії [7, 11, 20, 34, 35, 46, 50, 52, 159, 160].

Лежалість цементу, яка у ряді випадків явним чином не враховується при випробуванні зразків на механічну міцність, впливає на зниження їх морозостійкості, що пов'язано зі зміною контракційних показників цементів. Зменшення морозостійкості для зразків, виготовлених на шлакопортландцементі, що пролежали три місяці (без втрати механічної міцності), доходило до 50% [95, 112].

Внаслідок відмінностей у формах руйнування зразків, які можуть існувати з ряду причин, зовнішню оцінку руйнування по балах потрібно доповнювати визначенням швидкості проходження через зразок ультразвуку.

З підвищенням вмісту в цементі шлаку (наприклад до 60%) при оптимальному прискореному або тривалому водному, а також повітряно-вологому твердненні, що створює якість структури цементного каменю та розчину, рівноцінну пропареним зразкам (або зразкам інших таких само за якістю прискорених прийомів твердіння), підвищується їх морозостійкість.

На якість структури цементного каменю впливає вільне вапно, що виділяється при гідролізі С35, воно створює іншу ультрамікропористість.

При зв'язуванні вапна зі шлаком утворюється щільніша структура, новоутворення якої пройшли через процес контракції.

Однак, як з'ясувалося, показник механічної міцності зразків залізобетонних виробів не пов'язаний однозначно з показником їх стійкості, в даному випадку показником їх морозостійкості [1, 13, 33, 76, 77, 160, 165].

Морозостійкість зразків на портландцементях навіть при застосуванні оптимальних режимів пропарювання (за показниками твердіння зразків на шлакопортландцементях) завжди значно нижче, ніж у зразків на шлакопортландцементях, виготовлених на тих же початкових портландцементях.

Морозостійкість бетону також обумовлена будовою його порового простору. У цементному камені утворюються три види пор: пори цементного гелю, розмір яких лежить в межах $(15-40) \times 10^{-10}$ м, капілярні пори 0,01-1 мкм, умовно замкнуті пори 10-500 мкм.

Пори гелю характеризуються мінімальною проникністю для рідин та газів (коефіцієнт проникності для пор гелю менше 10^{-10} м/с). Перенесення рідкої фази в порах гелю можливе тільки за механізмом молекулярної дифузії. Вода в порах гелю при експлуатації бетонних і залізобетонних конструкцій не замерзає, що пояснюється їх розміром, вмістом в поровій рідині добавок-електролітів.

Капілярні пори можна представити як частину об'єму води цементного тіста, яка не заповнена продуктами гідратації цементу. Мікрокапіляри мають розмір менше 10^{-1} мкм. Вони мають здатність до капілярної конденсації вологи, що обумовлює гігроскопічність матеріалів. Макрокапіляри з радіусом більше 0,1 мкм (зазвичай до 10 мкм) заповнюються водою тільки при безпосередньому

контакті з нею. Капілярні пори є основним дефектом структури цементного каменю. У свіжозаформованому тісті можна вважати порами увесь простір, заповнений водою. При твердненні частина його заповнюється гелем. Чим більше міра гідратації цементу (α), тим більше утворюється гелю і тим менший об'єм залишається на капілярні пори. Дані по водопроникності цементного каменю і бетону показують, що перехід від безперервної системи пор до умовно ізольованої відбувається при капілярній пористості цементного каменю $P_k < 0,33$.

Температура замерзання води в капілярно-пористому тілі залежить від розмірів капілярів. Наприклад, в капілярах діаметром 1,57 мм вода замерзає при -6°C ; 0,15 мм – при -15°C ; 0,06 мм – при -18°C . В порах діаметром менше 0,001 мм вода практично не замерзає, вона набуває властивість псевдотвердого тіла. У порах, обумовлених контракцією, створюється вакуум, і вони заповнюються залежно від умов твердіння повітрям або водою. Контракційний об'єм розглядають у наш час не як самостійний вид пор, а як частину капілярної пористості. До умовно замкнутих пор відносять бульбашки повітря в цементному камені й бетоні. Сумарним об'ємом пор, їх розміром, кількістю і питомою поверхнею можна управляти введенням повітровтягувальних або газоутворюючих добавок. Повітряні пори, що отримуються шляхом введення у бетонну суміш повітровтягувальних добавок, істотно змінюють структуру цементного каменю. Кількість повітряних пор в 1 см^3 цементного каменю може досягати одного мільйона, а поверхня цих пор – $200\text{-}250\text{ см}^2$. Через цю поверхню поступає в повітряні пори надмірна вода, що витісняється з капілярів при заморожуванні бетону. Захисну дію мають лише досить дрібні повітряні пори розміром менше 0,5-0,3 мм. В якості критерію для оцінки ефективності захисної дії повітряних пор поширення отримав так званий "чинник відстані" [41, 45, 46, 47, 49, 51, 53, 67, 79].

Також збільшення V/C веде до зростання як загального об'єму відкритих пор, так і середнього їх розміру, що також негативно впливає на морозостійкість. При цьому підвищуються проникність та водопоглинання і в таких бетонах неможливе утворення істотного обсягу резервних пор. При проектуванні

морозостійких бетонів прийнято обмежувати В/Ц залежно від умов служби бетону в спорудах. Зниження В/Ц можливо як за рахунок зменшення витрати води при застосуванні пластифікуючих добавок, жорсткіших сумішей, так і за рахунок збільшення витрати цементу. Другий спосіб зниження В/Ц техніко-економічно неефективний.

Міра гідратації цементу залежить від активності цементу, інтенсивності зростання її в часі, тривалості і умов твердіння бетону. Міра гідратації портландцементів до 28-добового віку за усередненими даними дорівнює 0,6; 90 діб – 0,66 та 180 діб – 0,7. Підвищенню міри гідратації цементу сприяють різні способи його активізації та належний догляд за бетоном [80, 82, 85, 87, 88, 89].

Витрата води замішування відповідно до витрати цементу. За даними Горчакова П.І. [35, 36, 37, 38, 39, 40], кожен відсоток зниження капілярної пористості досягається зменшенням кількості води замішування на 10 л/м^3 або збільшенням витрати цементу на $20\text{-}35 \text{ кг/м}^3$. Збільшення витрати цементу, з одного боку, зменшує В/Ц, а з іншого – призводить до збільшення об'єму цементного тіста, що підвищує обсяг капілярних пор бетону.

Оптимальна витрата піску для забезпечення нормативної морозостійкості вища, ніж для забезпечення міцності, що пов'язано з умовами повітровтягнення. За даними Кунцевича О.В. [78], підвищення долі піску в суміші заповнювачів з $\gamma=0,33$, оптимальною за міцністю, до $\gamma=0,5$ призводить до зростання витрати цементу на 40 кг/м^3 , але підвищує морозостійкість зі 120 до 400 циклів.

Низьку морозостійкість мають пуцоланові цементи. Шлакопортландцементи за морозостійкістю займають положення між портланд- і пуцолановим цементом.

До зниження морозостійкості бетону призводить підвищення питомої поверхні цементу понад $400 \text{ м}^2/\text{кг}$. Такі надтонкі цементи характеризуються підвищеною усадкою, що веде до появи мікротріщин. Жорсткі вимоги пред'являються до обмеження величини втрати при прокалюванні, обумовленої лежалістю цементу. Зберігання (лежалість) цементу значно більше впливає на його морозостійкість, ніж на активність. На думку С.В. Шестоперова [150, 151,

152], наявність оболонки з новоутворень гідратованих мінералів на зернах цементу є однією з головних причин зниження довговічності бетону. Зазвичай вживані для отримання важкого бетону кварцовий пісок і щебінь з щільних вивержених або метаморфічних порід, що відповідають вимогам стандартів, дозволяють отримувати високоморозостійкий бетон. На морозостійкість бетону значний вплив мають морозостійкість самих заповнювачів та їх водопотреба. За даними О.В.Кунцевича [77, 78], морозостійкість заповнювачів неоднозначно пов'язана з їх міцністю. Неморозостійкі зерна можуть бути досить міцними і щільними з водопоглинанням 0,7-2%. Важливими позиціями морозостійкості є властивості заповнювачів, що визначають їх зчеплення з цементним каменем, і модуль пружності.

Пластифікуючі добавки підвищують морозостійкість бетону, в результаті чого зменшується водопотреба і, відповідно, капілярні пори, так само як внаслідок певного повітровтягнення. Добавки-пластифікатори типу ЛСТ знижують водопотребу бетонних сумішей на 9-12%, при цьому більший ефект пластифікації досягається в "жирних" сумішах на низькоалюмінатних цементах. Добавки цього типу сприяють повітровтягненню і утворенню в затверділому камені замкнутих пор. С.В.Шестоперов [150, 151, 152] спостерігав значне (у 2-3 рази) підвищення морозостійкості з добавкою СДБ (стара назва ЛСТ) навіть без зниження В/Ц для бетонів, що тверділи впродовж 1 року. Добавки суперпластифікатори дозволяють понизити водопотребу сумішей на 20-30%, проте вони, як правило, залучають недостатню кількість повітря, і поліпшення довговічності бетону визначається, головним чином, зниженням В/Ц. При використанні суперпластифікаторів для підвищення рухливості сумішей без зменшення В/Ц збільшення морозостійкості бетону досягається додатковим введенням повітровтягуючих добавок [128, 145, 165].

Гідрофобізуючі добавки, адсорбуючись на стінках пор бетону, знижують їх водопоглинання і капілярний підсос. Підвищенню морозостійкості сприяє пластифікуюча дія гідрофобізуючих добавок, особливо помітна в "худих" сумішах (8-10%). Основні повітровтягуючі добавки відносяться до

гідрофобізуючих ПАР, мають значну поверхневу активність на межі розчин - повітря. Ці добавки, при їх введенні з водою замішування, викликають утворення в системі досить високодисперсної емульсії повітря, що стійко диспергує у бетонній суміші [4, 19, 31, 42, 67, 130, 158].

Повітровтягуючі добавки, або так звані піноутворювачі, виготовляються у вигляді концентрованих розчинів, густих паст або сухого, легкорозчинного порошку. Для приготування добавок використовуються деревинні смоли, продукти переробки нафти, рослинні жири та інша сировина. Найчастіше в якості повітровтягуючих застосовують добавки на основі деревинної смоли (смола нейтралізована повітровтягуюча – СНП, синтетична поверхнево-активна добавка – СПД, обмилений деревинний пек та ін.). Їх вводять у бетонні суміші зазвичай у кількості 0,01-0,02% від маси цементу. При цьому обсяг залученого повітря складає 30-60 л/м³ або, як правило, 3-6% від маси цементу. Такий обсяг залученого повітря зазвичай істотно перевищує обсяг води, що відтісняється при заморожуванні. При цьому значення "чинника відстані" між повітряними порами виявляється значно меншим за критичне, яке зазвичай приймають 0,25 мм. Морозостійкість бетону з повітровтягуючими добавками зростає у декілька разів. Окрім виду і вмісту добавок, на повітровтягування впливають й інші чинники: легкоукладальність бетонних сумішей, тонкість помелу цементу, зерновий склад заповнювачів, час перемішування, температура. Разом з повітровтягуючими, для утворення системи умовно-замкнутих пор у бетоні, застосовують газоутворюючі добавки, наприклад ГКЖ-94. Є дані, що система умовно-замкнутих пор з добавкою ГКЖ-94 стабільніша, ніж у бетонах з повітровтягуючими добавками. Окрім особливостей початкових матеріалів і складу бетонної суміші, на морозостійкість бетону певний вплив мають умови його твердіння [31, 42].

Температура заморожування зразків (а за аналогією з випробуванням природних кам'яних матеріалів і швидкість їх заморожування, що для остаточного судження потрібно ретельно досліджувати) завжди має вирішальне значення для морозостійкості матеріалу. Невірно обмежувати умови випробування зразків зі штучного каменю (бетону і розчину) якими-небудь

температурами поза зв'язком з умовами роботи матеріалу. Це може призвести до випадкового результату: до застосування матеріалів як з підвищеними для цих умов характеристиками, що у ряді випадків збільшує вартість робіт, так і зі зниженими характеристиками, що викликають неприпустимі руйнування конструкцій, різке зниження їх довговічності, а у ряді випадків і аварійний стан. Пластичні суміші не дозволили отримати на їх основі довговічні матеріали для особливо низьких температур. Так, якщо зразок будь-якого складу за температури -25°C повністю руйнується в межах 200-220 циклів заморожування-відтавання, то за температури -64°C такий самий зразок руйнується в межах 30 циклів.

Вплив циклічної зміни температури посилюється додатковою дією розчинів солей. Широке поширення отримала практика застосування солей (NaCl , CaCl_2) для видалення льоду з дорожніх покриттів. В результаті танення льоду при посипанні солі на поверхню бетону поглинається велика кількість теплоти (334 Дж/г) і температура поверхні бетону різко знижується. На поверхні бетону фіксується пониження температури до 9°C впродовж 1 хв. ("температурний шок"), що викликає виникнення напруги розтягу. Дифузія солі у бетон призводить до виникнення градієнта її концентрації, що також викликає підвищену напругу, лущення і відшарування поверхневого шару. У присутності солей збільшуються осмотичні явища в заморожуваному бетоні, підвищується в'язкість рідкої фази. В результаті зростає величина гідравлічного тиску і прискорюється руйнування бетону. При поперемінному заморожуванні і відтаванні насичених водою залізобетонних конструкцій порушується відповідність температурних деформацій сталі і бетону, в результаті виникає значна внутрішня напруга і зменшується міцність зчеплення сталі з бетоном. Розтягуюча напруга в арматурі при заморожуванні насичених водою залізобетонних конструкцій може досягати 120-150 МПа.

Тріщини та капіляри. Явища, які відбуваються в капілярно-пористих матеріалах і градієнти температурних деформацій окремих компонентів матеріалу, призводять до появи розривів (нецілісності, мікротріщин), що може свідчити про початок морозного руйнування. В роботі [25] розглядається

зростання тріщини в умовах заморожування і відтавання. Тріщини як причина морозного руйнування матеріалів виникають після певної кількості циклів заморожування і відтавання [26, 27, 28, 29, 55, 57, 58, 59, 60, 61, 62].

Як вже вказувалось раніше, тріщини в КБМ є існуючими та активними елементами структури і як кожний елемент структури, вони теж сприймають вплив заморожування та відтавання.

В роботах [43, 57, 58, 59, 64, 65, 72, 2, 23, 24, 25, 28, 29, 36, 43, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 69] був проведений аналіз, який показав, що при проходженні циклів заморожування та відтавання в об'ємі технологічних тріщин відбувається зміна їх геометричних характеристик. При цьому утворюються нові елементи тріщини на берегах початкової тріщини в зоні границі розділу "лід-вода" та в зонах зміни напрямку траєкторії криволінійної тріщини і відбувається збільшення довжини початкової тріщини. Даний механізм був прийнятий за основу при моделюванні процесів заморожування.

Проведений аналіз дозволяє зробити такі висновки:

1. Основну увагу при призначенні складів і технології отримання морозостійких бетонів та конструкцій з них приділяється створенню необхідної капілярно-пористої структури. Необхідною умовою для підвищення морозостійкості бетонів є наявність резервних (умовно-замкнених) пор і капілярів, не заповнених рідкою фазою.

2. Для забезпечення необхідного розподілу пор і капілярів за розмірами рекомендується застосовувати цементи з вмістом СЗА до 6...7% середньої тонкості помелу, повітровтягуючі або газоутворюючі добавки, пластифікуючі добавки із заданою пористістю. Дрібні й крупні заповнювачі мають відповідати вимогам нормативних документів для морозостійких бетонів. Формування та ущільнення бетонних сумішей повинно забезпечувати однорідність властивостей бетону по всьому об'єму конструкцій. Режими твердіння і догляду за бетоном не мають викликати появу певного напрямку спрямованої пористості. Експлуатація конструкцій повинна супроводжуватися інженерно-технологічними заходами з підтримки заданих показників за морозостійкістю.

3. У спеціальній літературі досить мало відомостей про вплив таких структурних елементів як тріщини на механізми морозного руйнування КБМ. Оскільки тріщини та поверхні розподілу є невід’ємними та активними елементами структури будь-якого КБМ, то доцільно дослідити їх реакцію на різні типи впливу заморожування та відтавання.

Висновки за 1-м розділом

1. Морозостійкість – це здатність матеріалів в зволоженому стані витримувати без руйнування багаторазове заморожування, що чергується з розморожуванням. Існують різні гіпотези, які пояснюють механізми морозного руйнування бетону. В їх основі лежить знання, що об’єм льоду більший ніж той, що займає вода, яка поступово змінює внутрішню структуру зволоженого матеріалу. Також експериментально доведено, що морозостійкість бетону безпосередньо визначається таким параметром як водопоглинання. Однак в реальності процес набагато складніший.

2. Аналіз умов експлуатації більшості будівельних виробів і конструкцій (огороджувальні конструкції будівель і споруд різного призначення, греблі, облицювання каналів, напірні і безнапірні труби, ЛЕП тощо) показав, що, як правило, зовнішні кліматичні умови діють на них однобічно або локально. Можна припустити, що при різних типах впливів поведінка матеріалів у виробках буде значно відрізнятися.

3. Механізми морозного руйнування будівельних матеріалів ґрунтуються на певних гіпотезах. Відомо, що об’єм води на 9% менше ніж об’єм льоду і через це усередині матеріалу утворюється напруга, яка може бути руйнівною для конструкції. Це лягло в основу основних гіпотез, що пояснюють утворення напруг, що виникають в будівельних матеріалах як капілярно-пористих тілах в результаті утворення льоду. Аналіз літератури показав, що інформація про розподіл деформацій та напруг в будівельних виробках та конструкціях при однобічній дії від’ємних (мінусових) температур відсутня.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

І ХАРАКТЕРИСТИКА ВИКОРИСТАНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Блок-схема дослідження

Для досягнення поставленої мети та задач дослідження була розроблена блок-схема дослідження.

Для підвищення ефективності досліджень, з врахуванням встановлення причинно-наслідкових зв'язків, потрібно визначати обґрунтовану послідовність виконання робіт. Це необхідно при переході від одного етапу досліджень до наступного при безперервному накопиченні інформації, її переробки та коригуванні методів вирішення поставлених завдань. Експериментальна частина кожного етапу має бути обґрунтована проведенням науково-теоретичним аналізом. По завершенню певного етапу експериментальних робіт слід обробляти та оцінювати отримані дані та встановлювати їх зв'язок з попереднім етапом досліджень. Для формалізації послідовності виконання взаємопов'язаних етапів роботи, була розроблена блок-схема досліджень (рис. 2.1).

Етап 1. "Постановка проблеми". На цьому етапі обґрунтовується необхідність вирішення проблеми і на підставі накопиченої до початку робіт інформації висувається робоча гіпотеза.

Етап 2. "Вибір об'єкту досліджень". На основі сформульованої гіпотези обирається об'єкт досліджень: цементний камінь, розчин, бетон важкий.

Етап 3. "Збір і аналіз інформації". Встановлено, що для вирішення проблеми необхідно спиратися на основні положення фізико-хімічної механіки дисперсних систем і матеріалів, поліструктурну теорію композиційних матеріалів, механізми руйнування та ін.

Етап 4. "Визначення мети і завдань досліджень".

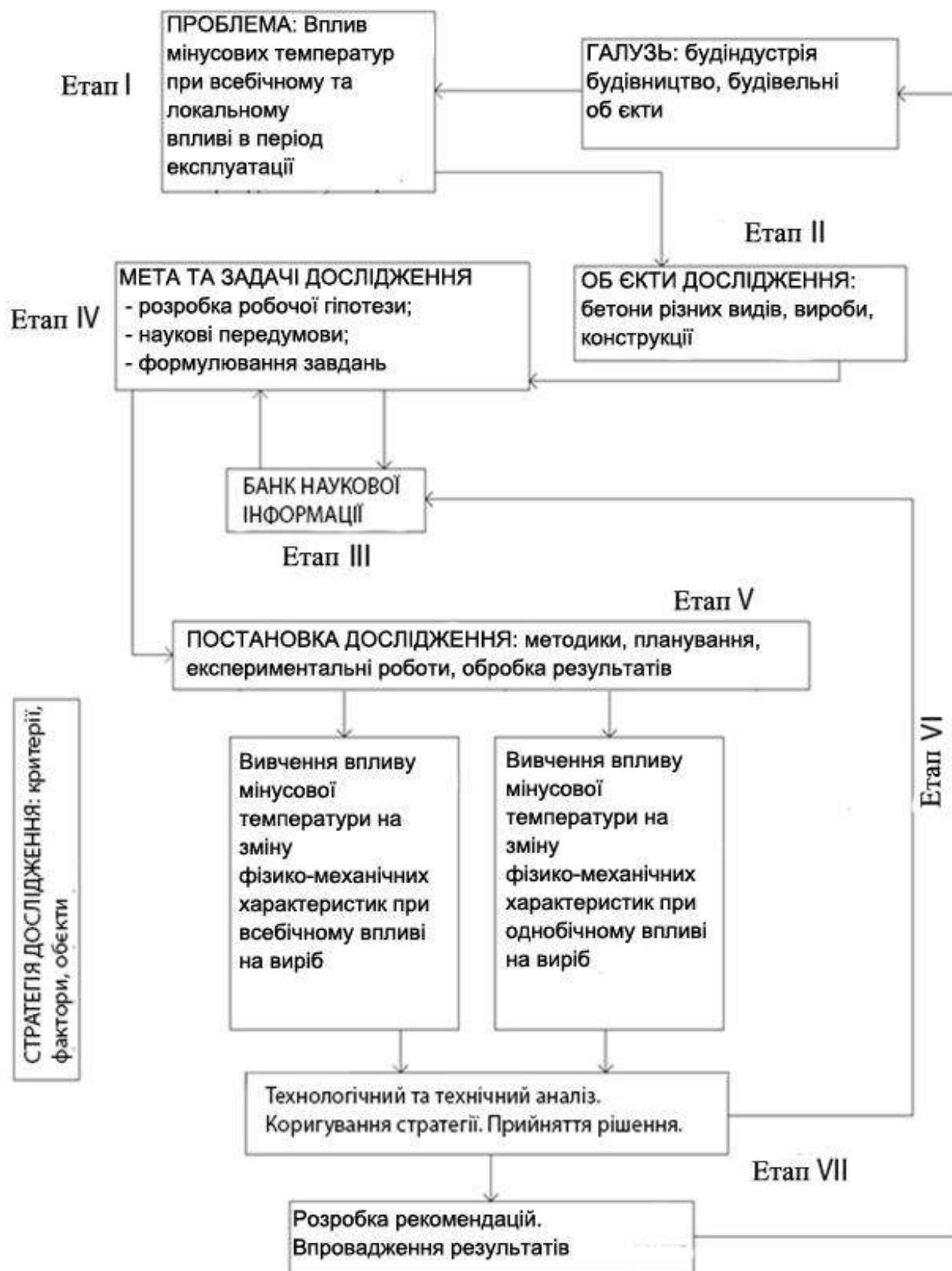


Рис. 2.1. Блок-схема дослідження

Етап 5. "Постановка досліджень". На цьому етапі розробляється методика експериментальних робіт відповідно до теоретичних передумов. Згідно з розробленою методикою і планом проводяться експерименти, що є змістовною частиною.

Етап 6. "Технологічний і технічний аналіз". На підставі отриманих даних робляться відповідні висновки, робиться коригування постановки досліджень і вибір раціональних рішень.

Етап 7. "Розробка рекомендацій. Впровадження результатів досліджень". На підставі проведеного комплексу досліджень розробляються рекомендації з врахування впливу від'ємних температур при однобічній і локальній дії в зразках з цементного каменю, розчину і бетону та з оцінки морозостійкості будівельних матеріалів в залежності від умов експлуатації об'єктів, для яких вони призначені, для впровадження у виробництво та використання досліджень в навчальному процесі в циклах лекцій та практичних роботах за дисциплінами, пов'язаними з технологією, структуроутворенням та експлуатацією будівельних матеріалів та виробів.

Розроблена блок-схема дозволяє адекватно реалізувати мету та задачі дослідження з урахуванням змін та уточнень по мірі виконання практичних експериментально-теоретичних досліджень.

2.2 Характеристики використаних матеріалів

В якості в'язучого матеріалу використовувався цемент ПЦ500 Д0 "Lafarge", мінералогічний склад та фізико-механічні властивості якого наведені в табл. 2.1.

В якості дрібного заповнювача використовувався пісок Вознесенського кар'єру, властивості якого представлені в табл. 2.2 та табл. 2.3.

В якості крупного заповнювача використовувався гранітний щебінь ГП "Первомайський Гранітно-щебеновий кар'єр", властивості якого наведені в табл.2.4.

Таблиця 2.1

Мінералогічний склад та фізико-механічні властивості цементу

ПЦ500 Д0 "Lafarge"

Марка за міцністю, кгс/см ²	ДСТУ		Активність, кгс/см ²	Коефіцієнт нормальної густини	Питома густина, P_t , кг/м ³	Насипна густина, P_n , кг/м ³	Тонкість помелу, залишок на ситі 0,08%	Питома поверхня, см ² /г	Мінералогічний склад, %
	Технічні вимоги	Методи випробувань							
500	2.7-46:2010	196-1:2007	55	0,27	3100	1300	Не більше 15%	2600 - 3200	C ₃ S=45 C ₂ S=25 C ₃ A=10 C ₄ AF=15

Таблиця 2.2

Характеристики дрібного заповнювача (піску Вознесенського кар'єру)

Показники	Значення
Істинна густина, кг/м ³	2580
Насипна густина, кг/м ³	2330
Модуль крупності	2,27
Вміст глинистих часток, % по масі	3,6
Водоутримуюча здібність піску, %	5

Таблиця 2.3

Зерновий склад піску, %

№ сита Залишки	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	Дно
Часткові	3,3	3,5	27,2	51,9	11,5	0,9
Повні	3,3	6,8	34	85,9	97,4	98,3

Таблиця 2.4

Характеристики крупного заповнювача
(гранітного щебеню ГП "Первомайський Гранітно-щебеновий кар'єр")

ДСТУ	Питома густина, ρ_i , кг/м ³	Насипна густина, ρ_n , кг/м ³	Вологість, W, %	Фракція, мм	Марка дрібності	Вміст глинистих часток, %	Кількість пластинчастих та голчастих частин, %
2.7-75-98	2650	1500	2	5-10 10-20	16	2	2,5

Дослідження проводилися на зразках:

- розміром 4×4×16 см – з цементного каменю (В/Ц=0,28) та розчину (Ц/П=1/2; В/Ц=0,5).
- розміром 10×10×10 см та 10×10×40 см – з бетону класу С30/35 (склад суміші: Ц=315 кг/м³, П=660 кг/м³, Щ=1200 кг/м³, В=140л/м³).

2.3 Методика проведення експериментів

2.3.1 Методика ізоляції зразків

Методика ізоляції зразків була розроблена згідно з поставленою метою та задачами дослідження та полягала в моделюванні однобічного впливу зміни температур.

Для цього були підібрані відповідні матеріали та сформована конструкція, яка дозволяє частині зразка бути ізольованим від дії навколишнього середовища.

Матеріал для ізоляції зразків підбирався з урахуванням його мінімального коефіцієнта теплопровідності. Для ізоляції був обраний пінополістирол з теплопровідністю 0,031 Вт/(м°С) і щільністю 33кг/м³. З використанням даного

матеріалу була побудована теплоізоляційна ємність (рис. 2.2). Для гідроізоляції частини зразка використовувався шар з латексу (повітряна кулька). Для зменшення швидкості теплопередачі зразок додатково був обгорнутий шаром з фомісолу (5 мм) для утримання тепла всередині конструкції (рис. 2.3).

Фомісол – фольгований утеплювач на основі спіненого поліетилену. Покриття з плівки з напиленням алюмінію або з захищеної алюмінієвої фольги наноситься на основу з однієї або двох сторін (в нашому випадку – з однієї). Теплопровідність становить $0,049 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$. Стики між конструкцією та зразком закриваються теплоізоляційною мінеральною ватою.

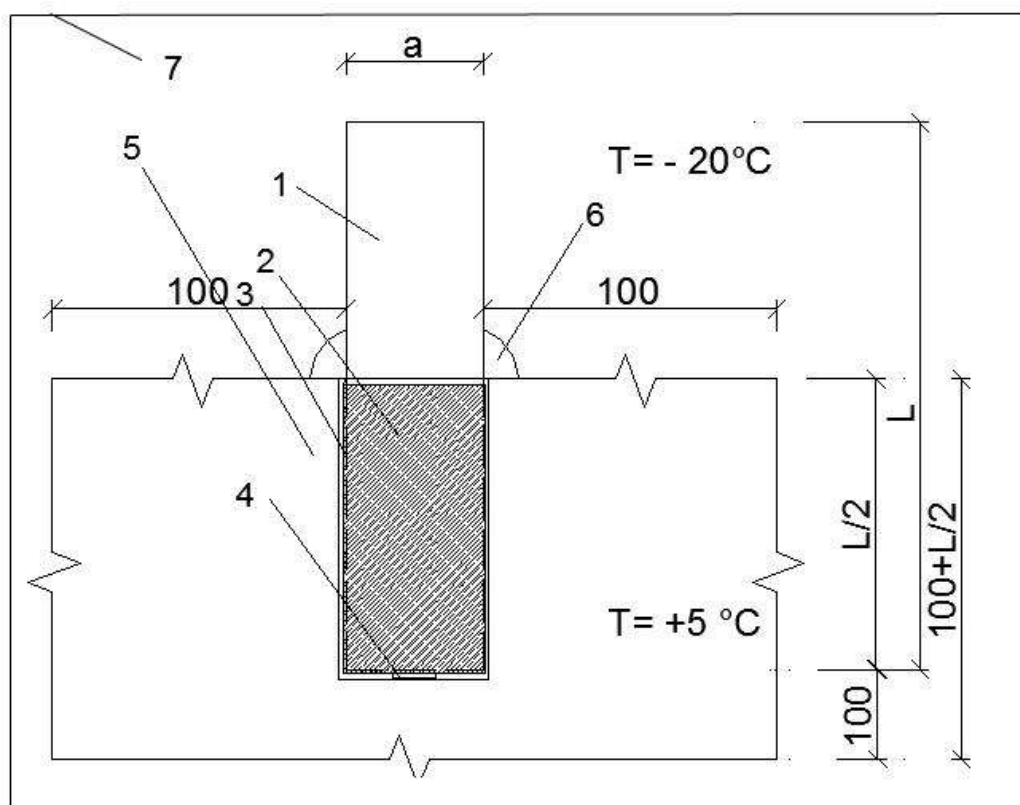


Рис. 2.2. Схема одностороннего замораживания образцов

1 – частина зразка, яка піддавалась заморожуванню-відтаванню; 2 – частина зразка, яка підтримувалась в плюсовому діапазоні температур; 3 – фомісол; 4 – термометр; 5 – пінопласт; 6 – мінеральна вата; 7 – морозильна камера

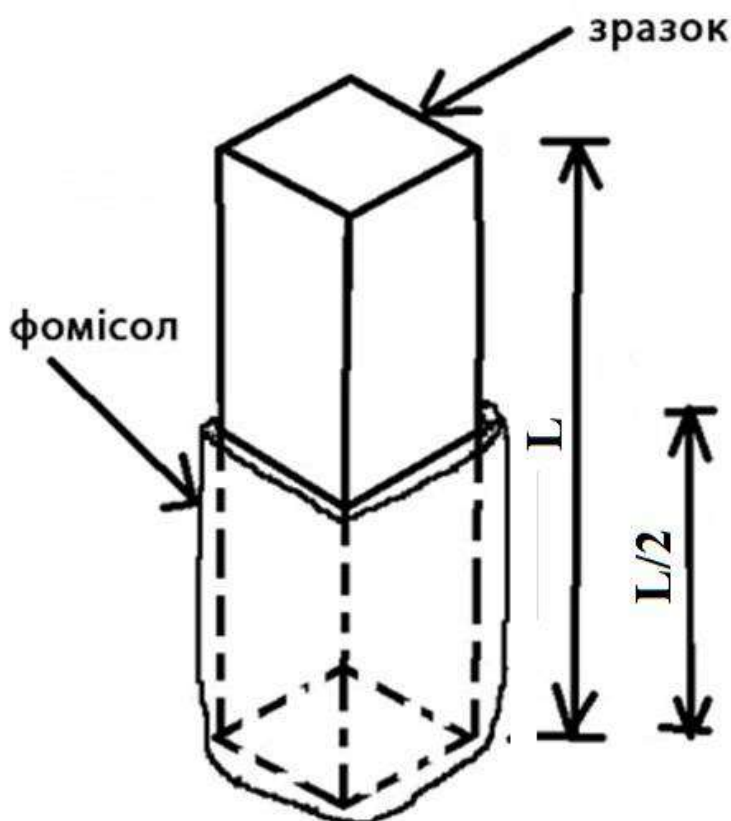


Рис. 2.3. Схема захисту зразка від дії від'ємної температури

2.3.2 Умови заморожування зразка

Виготовлені для проведення дослідження зразки були поділені на 3 групи.

Зразки перших двох груп піддавались двом різним типам впливу морозного руйнування. Зразки третьої групи були контрольними.

При першому типі впливу зразки піддавались об'ємному заморожуванню в морозильній камері за $T = -20 (\pm 2)^\circ\text{C}$, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-47-96 "Бетони. Методи визначення морозостійкості. Загальні вимоги". Перед заморожуванням зразки поміщалися в ванну з водою до повного насичення. Один цикл заморожування-відтавання включав в себе заморожування протягом 2 годин і відтавання за $T = +20^\circ\text{C}$ протягом 3 годин (О1) в сольовому розчині. Після кожних 5 циклів зразки висушувалися і визначалися їх необхідні характеристики.

Друга група зразків піддавалась впливу однобічного заморожування. Зразки при заморожуванні поміщалися в теплоізоляційну ємність (рис. 2.2), де одна половина зразка (O2+) була суха та теплоізована (температура навколишнього повітря не менше $+ 5^{\circ}\text{C}$), а друга частина (O2-) заморожувалась (температура навколишнього повітря $T = -20 \pm 2^{\circ}\text{C}$) і відтавала в 5% сольовому розчині.

Зразки третьої групи (O3) знаходилися в камері нормального тверднення і їх характеристики перевірялися разом з іншими зразками після кожних 5 циклів.

Прийнята методика дає змогу проаналізувати вплив умов заморожування на зміну основних властивостей матеріалу.

2.3.3 Методи випробувань і контрольовані параметри

Для досягнення мети та задач дослідження був прийнятий набір параметрів, що дозволяють оцінити зміну характеристик матеріалу під час проходження циклів заморожування-відтавання.

Вплив багаторазового заморожування та відтавання на зміну властивостей зразків оцінювався за зміною таких фізичних та механічних показників: геометричні розміри ($a \times b \times c$), маса (Δm), водопоглинання (W), швидкість проходження ультразвуку (V), міцність, визначена неруйнівним методом (за допомогою імпульсного пістолету), коефіцієнт пошкодженості (K_n), міцність на розтяг при згині ($f_{c.tf}$), міцність на розтяг при розколюванні ($f_{c.m}$), міцність на стиск ($f_{c.cube}$).

Заморожування-відтавання проводили за другим прискореним методом згідно ДСТУ Б В.2.7-47-96. Співвідношення між числом циклів випробувань і маркою бетону за морозостійкістю для методів, що засновані на заморожуванні-відтаванні, представлено у табл. 2.5.

Характеристики матеріалу визначалися після кожних 5 циклів заморожування-відтавання за прискореним методом. Зразки з цементного каменю проходили 20 циклів, з розчину та бетону – 40 циклів.

Таблиця 2.5

Співвідношення між числом циклів випробувань і маркою бетону за морозостійкістю для методів, що засновані на заморожуванні-відтаванні

Методи випробування	Кількість циклів заморожування-відтавання для бетону марки за морозостійкістю						
	F25	F35	F50	F75	F100	F200	F300
Перший	25	35	50	75	100	200	300
Другий	-	-	8	13	20	30	45

Геометричні розміри визначалися за допомогою лінійки та штангенциркуля. Похибка лінійних розмірів зразків не перевищувала ± 1 мм.

Маса зразків визначалась за допомогою ваг з точністю до 0,1 г.

Визначення водопоглинання зразків проводилось відповідно до ДСТУ Б В.2.7-170:2008 "Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності" з використанням сушильної шафи, яка підтримує температуру 95 ± 5 °С.

Швидкість поширення ультразвуку в повністю висушених зразках визначалась приладом УК-14пм відповідно до ДСТУ Б В.2.7-226:2009 "Будівельні матеріали. Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності".

Для *оперативного неруйнівного контролю міцності* та однорідності бетону і розчину методом ударного імпульсу використовувався прилад ІПС-МГ4.03 згідно ДСТУ Б В.2.7-220:2009 "Будівельні матеріали. Бетони. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю".

Міцність зразків також визначалась згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009 "Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками" на гідравлічному пресі.

Прийняті методи випробувань та контрольовані параметри дали змогу досягти поставленої мети та задач дослідження.

Стійкість матеріалу (здатність матеріалу зберігати свої властивості в хімічно агресивному водному та газовому середовищі, зберігати свої

експлуатаційні якості при роботі в несприятливих умовах зовнішнього середовища) визначалась за коефіцієнтом стійкості матеріалу. Коефіцієнт стійкості – відношення кількісного значення того чи іншого показника матеріалу у віці 28 діб та після проходження певних випробувань:

$$K_{\text{ст}} = f_{28} / f_n \quad (2.1)$$

де:

- $K_{\text{ст}}$ – коефіцієнт стійкості;
- f_{28} – характеристика зразка у віці 28 діб;
- f_n – характеристика зразка після проходження певних випробувань.

2.3.4 Методи виявлення і фіксації тріщин

В якості базового методу виявлення технологічних тріщин в цементному камені та бетоні був прийнятий метод, описаний в патенті України на винахід № 5735. Суть методу полягає в тому, що зразок або фрагмент зразка поміщається на фіксований час у водний розчин таніну в заданій концентрації, після чого витягується і висушується за температури 100 °С. На відкритих поверхнях зразків "друкується" малюнок тріщин, що дозволяє виміряти їх загальну протяжність та знайти співвідношення довжини тріщини до площі поверхні, на якій вони з'явилися.

Методика виявлення технологічних тріщин та внутрішніх поверхонь розділу заснована на здатності танінів змінювати своє забарвлення залежно від лужного середовища, з яким вони взаємодіють. В якості індикатора зміни рН в районі виходу тріщини на поверхню зразка були використані розчини танінів, що містяться в настоянках таніномістких матеріалів (чорний чай, зелений чай і настоянка на дубовій корі) (рис. 2.4).

співвідносили з площею поверхні, на якій вони проявилися. Загальна протяжність L визначається як сума довжин активних елементів:

$$L = l_1 + l_2 + \dots + l_i \quad (2.2)$$

$$K_{\pi} = L/S \quad (2.3)$$

де L – загальна довжина тріщин, см;

$l_1, l_2 \dots l_i$ – довжина окремої тріщини, см;

S – площа, на якій знаходяться тріщини, см^2 .

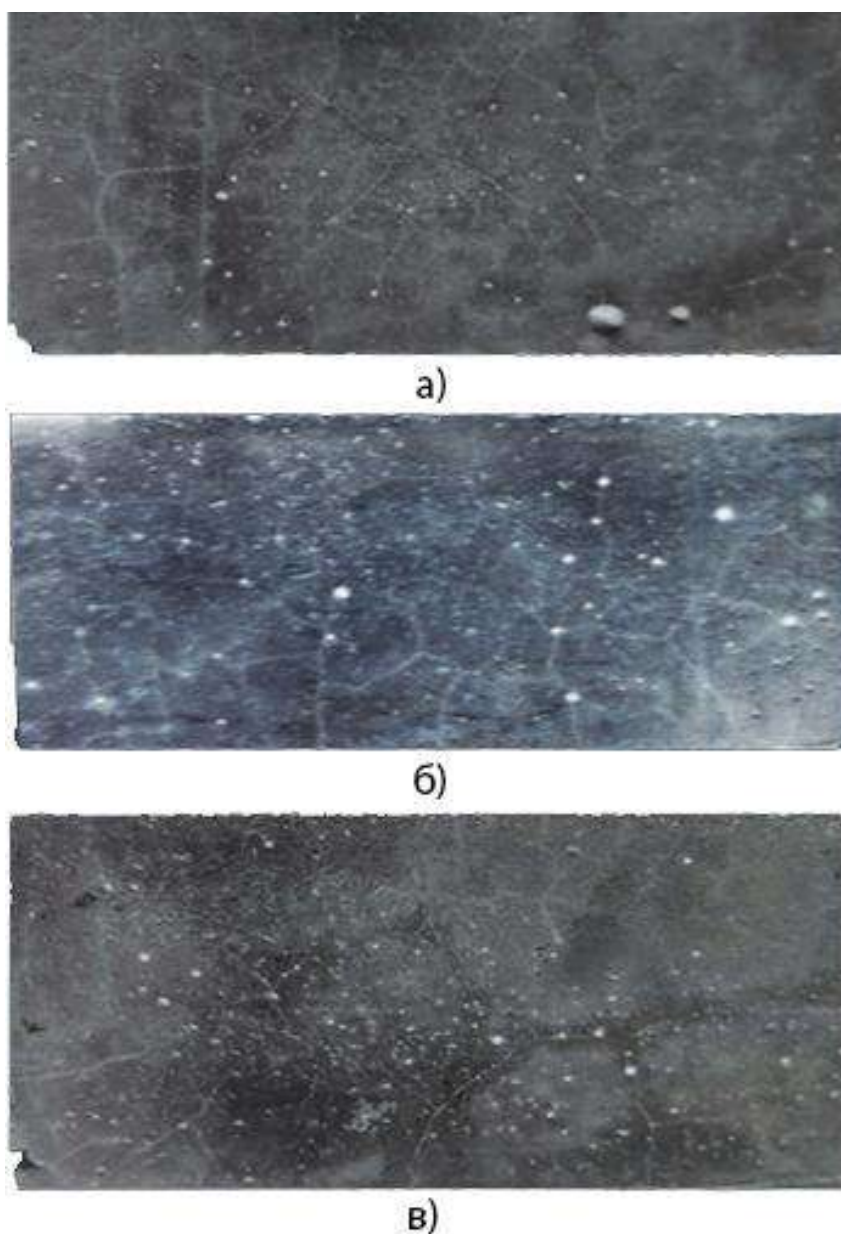


Рис. 2.5. Фотографії зразків з різними видами таніномістких розчинів:

а) зелений чай; б) настоянка дубової кори; в) чорний чай

Запропонований метод дозволяє оцінити зміни інтегрального пошкодження після структурних змін, що відбулися в матеріалі після та під час дії зовнішніх впливів. Даний метод дозволяє оцінити пошкодженість:

– через загальну протяжність тріщин:

$$K_{\text{пТ}} = L_{\text{Т}} / S, \text{ см/см}^2 \quad (2.4)$$

– через протяжність ВПР:

$$K_{\text{пр}} = L_{\text{пр}} / S, \text{ см/см}^2 \quad (2.5)$$

Зміну коефіцієнту пошкодженості можна оцінити із співвідношення:

$$\Delta K_{\text{п}} = K_{\text{п}} / K_{\text{п0}} \text{ см}^2 / \text{см}^2 \quad (2.6)$$

де $L_{\text{Т}}$ – загальна протяжність тріщин, см;

S – площа поверхні, см^2 ;

$\Delta K_{\text{п}}$ – зміна коефіцієнту пошкодженості, см/см^2 ,

$K_{\text{п0}}$ – коефіцієнт технологічної пошкодженості, см/см^2 ;

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт пошкодженості після впливу на зразок експлуатаційних навантажень, см/см^2 [25].

Для отримання візуального результату зразок оброблявся і фіксувався на фотоапарат, після чого для поліпшення якості зображення знімки оброблялися. Всі тріщини виділялися за допомогою програми AutoCAD і визначалась сумарна довжина тріщин [99].

Висновки за 2-м розділом

Прийняті відповідно до розробленої блок-схеми досліджень об'єкти аналізу, матеріали, що використовуються при виготовленні зразків і виробів, методи експериментальних і аналітичних досліджень дозволяють виконати завдання досліджень і досягти поставленої мети роботи.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ РОЗВИТКУ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ ОДНОБІЧНОМУ ТА ОБ'ЄМНОМУ ЗАМОРОЖУВАННІ

3.1 Об'ємне заморожування бетону як капілярно-пористого тіла

При розгляданні будівельних матеріалів як капілярно-пористих систем основна увага приділяється процесам і явищам, які протікають в порах і капілярах різного розміру при замерзанні в них води. До основних факторів, що впливають на морозостійкість капілярно-пористих систем, можна віднести:

- тиск льоду на стінки пор і капілярів;
- гідравлічний тиск незамерзлої води та її міграція по ослабленим місцям;
- капілярні ефекти, пов'язані зі зміною температури фазового переходу води в залежності від перетину капілярів;
- явища осмосу, пов'язані з виникненням градієнтів концентрації порової рідини при утворенні льоду;
- кристалізаційний тиск, що виникає при виділенні з перенасиченої порової рідини кристалів розчиненої речовини.

Гіпотези, описані в розділі 1, майже всі ґрунтуються на тому, що існує ефект "фронту промерзання". Дані підходи базуються на гіпотезі, яку запропонував і проаналізував професор Сумгін М.І. для ґрунтів вічної мерзлоти. В роботі [138] описаний процес, який відбувається при однобічному заморожуванні, де формується своєрідний "фронт промерзання", що сприяє витісненню вільної води в глибинні шари матеріалу.

Сумгін М.І. розглядав модель ґрунту як своєрідну дисперсну систему, властивості якої залежать від характеру і рівня взаємодії окремих частинок дисперсної фази між собою та з дисперсійним середовищем (водою). При замерзанні води в поровому просторі такої системи (V_0) відбувається збільшення об'єму системи пропорційно зміні об'єму дисперсійного середовища вільної води. Таким чином, ділянка дисперсної системи, яка зазнавала вплив від'ємної

температури (V_1), збільшується в об'ємі, що викликає передачу частини об'ємних деформацій на інші шари системи ($V_1 \dots V_i$). Аналізуючи механізм протікання цього процесу, логічно зробити висновок, що в результаті однобічного збільшення об'єму виникає рівномірний тиск, який веде до того, що, промерзаючи, частина системи, як поршень, тисне на глибинні шари, витісняючи з них частину вільної води вглиб системи (рис 3.1).

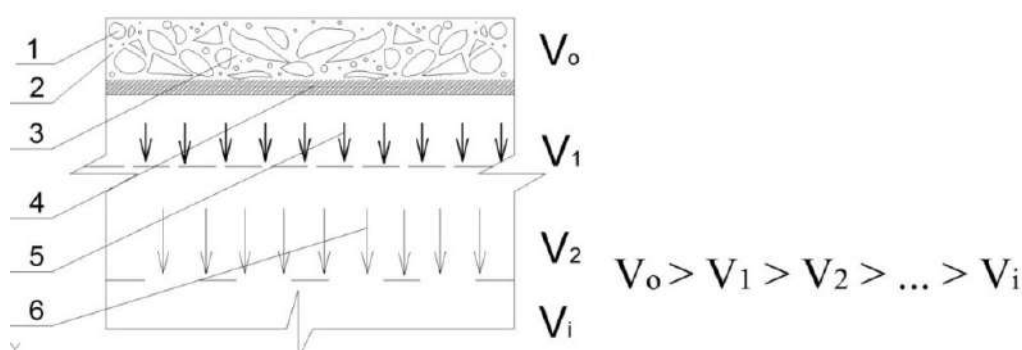


Рис. 3.1. Схема проходження фронту промерзання

($V_0 - V_i$) — уявні шари промерзання; 1 — фрагмент дисперсної системи; 2 — дисперсне середовище; 3 — об'єм системи, який замерзає; 4 — збільшення об'єму системи за рахунок збільшення об'єму дисперсійного середовища; 5 — тиск, який виникає при збільшенні об'єму дисперсного середовища; 6 — фронт промерзання

Оскільки будівельні матеріали на неорганічному в'язучому представляють у вигляді капілярно-пористих середовищ, то формування інтегрального фронту промерзання пов'язують з процесами і явищами, які відбуваються в окремих порах і капілярах.

Історично так склалося, що подібний механізм витіснення води був прийнятий як основний при описанні процесів, які відбуваються в окремому капілярі. На цьому базується гіпотеза зниження морозостійкості будівельних матеріалів та розробляються рецептурно-технологічні заходи щодо створення так званої резервної пористості для стоку води, що витісняється при замерзанні в об'ємі капілярів.

Навіть якщо прийняти певну ідентичність процесів, які відбуваються при формуванні фронту промерзання в дисперсних системах та капілярно-пористих тілах, то виникає питання: де зупиниться фронт промерзання в умовах об'ємного заморожування будівельних виробів (зразків). Це питання зумовило поставити задачу проаналізувати механізм формування фронту промерзання в зразках матеріалу, який розглядається як капілярно-пористе тіло.

В якості об'єкта аналізу прийнята модель зразка в формі куба розміром $a \times a \times a$, виготовлена із матеріалу, який має певну капілярно-пористу структуру.

При заморожуванні проходить замерзання вільної води в поверхневих порах та капілярах, що веде до формування фронту.

Подібний процес буде відбуватись до того моменту, коли вода створить в об'ємі зразка ядро перенасиченої вологи. Подальший процес заморожування почне перетворювати воду в лід, при цьому збільшуючись в об'ємі та викликаючи внутрішній тиск, що має призвести до руйнування зразка (виробу) зсередини (рис.3.2.б).

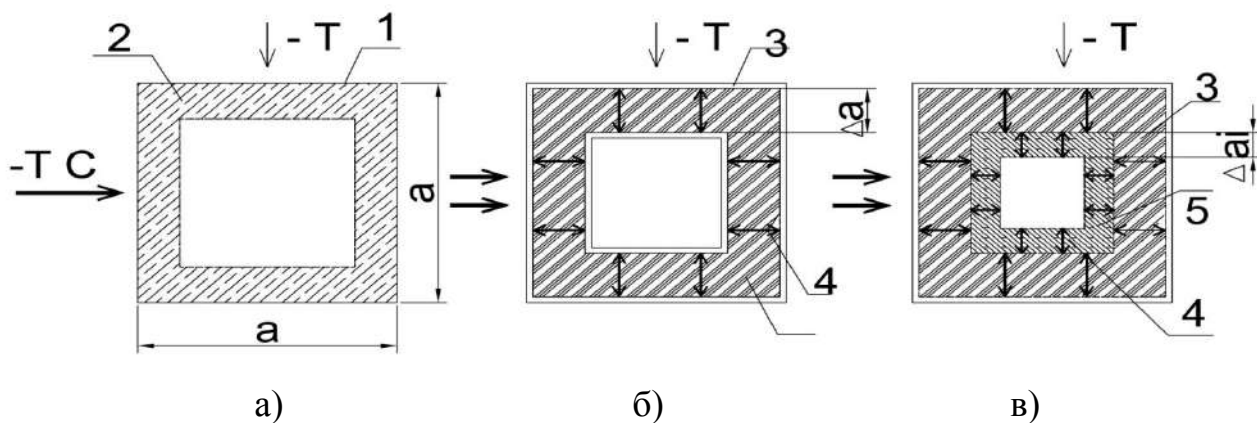


Рис. 3.2. Механізм морозного руйнування капілярно-пористих тіл

а) початок заморожування вологи в зразку; б) початок формування різноспрямованого тиску; в) формування різноспрямованого тиску в глибинних шарах; 1 – зразок; 2 – зона промерзання; 3 – зона замерзлої води; 4 – тиск льоду; 5 – зона перетворення води на лід

Під фронтом промерзання в даному випадку розуміється умовна лінія для двовірних моделей (умовна площина для тривимірних моделей), яка відділяє

зону, в якій вільна вода вже перейшла в твердий стан, від зони, де вона ще залишається водою.

Згідно прийнятим гіпотезам [21, 32, 39, 44, 48, 64, 119, 136, 161], при збільшенні об'єму води, при її переході в твердий стан, лід тисне на ще вільну воду в капілярах. Це призводить до переміщення води в глибинні зони зразка. Оскільки вода переміщується під певним тиском, що веде до виникнення гідравлічних ефектів, то можна припустити збільшення розмірів капілярів. Одночасно певна кількість вільної води замерзає, що викликає переміщення фронту промерзання.

Для більш детального аналізу механізму протікання процесу заморожування води в окремому капілярі була розроблена схема розвитку деформації при заморожуванні води в окремому капілярі (тріщині) (рис. 3.3).

В якості об'єкта дослідження прийнятий зразок розміром $a \times a \times a$, виготовлений з матеріалу, який має в своїй структурі такі елементи як пори, капіляри, поверхні розділу та тріщини.

Для аналізу виділимо плоский фрагмент зразка, який включає в себе клиновидний капіляр (поверхні розділу, тріщину). Припустимо, що властивості матеріалу, в якому розташовані несучільності, є ізотропними по всьому об'єму, та що матеріал адекватно реагує на зміну температури і здатен деформуватись під дією зовнішнього навантаження. Крім того, припускаємо, що радіус капілярів та ширина розкриття поверхонь розділу та тріщин є перемінними по їх довжині. Це припущення дозволяє більш об'єктивно дослідити механізми заморожування в залежності від форм фізичного зв'язку води з поверхнею несучільностей.

При зволоженні вода повністю заповнює об'єм капіляра (тріщини). Геометричні характеристики капіляра дозволяють воді бути в вільному стані, поліадсорбційному стані та в моноадсорбційному стані. Це передбачає, що зміна агрегатного стану води буде залежати від її форм зв'язку з твердою поверхнею. Повне водопоглинання зразка складає W_0 при досить рівному розподілі вологи по об'єму.

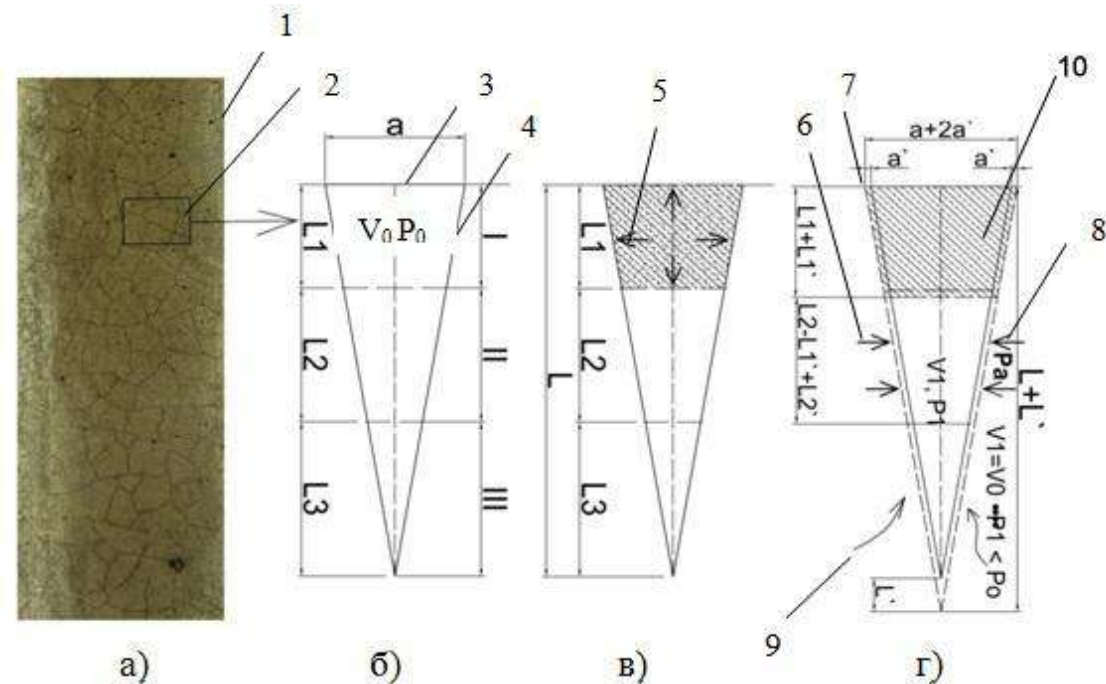


Рис. 3.3. Характер зміни геометричних характеристик капіляра (тріщини) при замерзанні в його об'ємі води

а – тріщини на поверхні зразка з цементного каменю; б – геометричні характеристики перерізу капіляра (тріщини); в – розподіл тиску при замерзанні частини вільної води в капілярі (тріщині); г – зміна геометричних розмірів капіляра (тріщини); 1 – зразок; 2 – фрагмент зразка; 3 – капіляр (тріщина); 4 – стінка капіляра (берега тріщини); 5 – напрямок тиску льоду на стінки капіляру (береги тріщини); 6 – напрямок розвитку деформацій за рахунок зниження температури; 7 – стінки капіляра (берега тріщини) після замерзання вільної води; 8 – атмосферний тиск (P_A); 9 – напрямок міграції вільної води з несучільностей; 10 – ділянка об'єму льоду; $L1$ – зона вільної води; $L2$ – зона поліадсорбційної води; $L3$ – зона моноадсорбційної води; V_0 – об'єм капіляра (тріщини); P_0 – тиск в об'ємі капіляра (тріщини); $V1...Vi$ ($P1...Pi$) – об'єм (тиск) при замерзанні вільної води

Вільна вода починає замерзати за $T \leq 0^{\circ}\text{C}$. По мірі зниження температури, весь об'єм вільної води перетворюється на лід (рис. 3.3.б).

Відомо, що зміна агрегатного стану води при від'ємних температурах є об'ємним процесом. Це означає, що вздовж капіляра (тріщини) об'єм льоду збільшиться лише на приблизно 3%.

Тиск льоду на стінки викликає їх переміщення, що веде до зміни геометричних характеристик капіляра. На зміну геометричних характеристик капілярів, а також інших несуцільностей, впливають деформації, пов'язані зі зміною температури твердої складової матеріалу. Сукупна дія деформацій від дії льоду та термічних деформацій викликає переміщення стінок капіляру або берегів тріщини та поверхонь розділу. Це призводить до збільшення об'єму несуцільностей на величину ΔV ($\Delta V = V_1 - V_0$). В свою чергу, збільшення об'єму несуцільностей викликає пропорційне зменшення тиску в об'ємі капіляра (тріщини). Зменшення тиску в об'ємі капіляра веде до виникнення градієнту тиску на границі переходу "лід-поліадсорбційна вода" за рахунок атмосферного тиску.

Різностямована дія тиску льоду та атмосферного тиску веде до виникнення та розвитку деформацій зсуву, що може спричинити утворення нових несуцільностей.

Зміна геометричних характеристик несуцільностей при одночасній зміні їх об'єму та внутрішнього тиску зумовлює прояву ефектів чергового масопереносу. Зниження внутрішнього тиску веде до підйому вільної води з глибинних шарів капілярів, пор, тріщин. Внаслідок градієнтів тиску є можливим процес дифузійного масопереносу води з аморфної складової матеріалів на неорганічних в'язучих. Крім того, відбувається направлена міграція води за рахунок градієнтів температур. Відомо, що в капілярно-пористих структурах вода переміщується в напрямку ділянок з більш низькою температурою.

Заповнення об'єму несуцільностей новими порціями води викликає її перерозподіл по формам її зв'язку з площею поверхні несуцільностей. Частина води збільшує долю вільної води, що веде до збільшення об'єму льоду та до

нового етапу розвитку деформацій та змін геометричних характеристик несучільностей. Насичення несучільностей новими порціями води веде до перерозподілу частки полі- та моноадсорбційної води. По мірі подальшого зниження температури все більше води переходить в твердий стан, формуючи нові деформаційні процеси та переспрямовані процеси внутрішнього масопереносу.

Процеси та явища, які розвиваються в окремому капілярі при замерзанні в їх об'ємі води, притаманні всій сітці несучільностей, що дозволяє дослідити розвиток подій в інтегральній капілярно-пористій структурі зразка (виробу). На основі цих знань була змодельована схема формування фронту промерзання при об'ємному заморожуванні зразка (рис. 3.4). При аналізі виходимо з припущення, що вода нерівномірно розподілена по всій системі несучільностей з загальним водонасиченням W_0 (рис. 3.4.а).

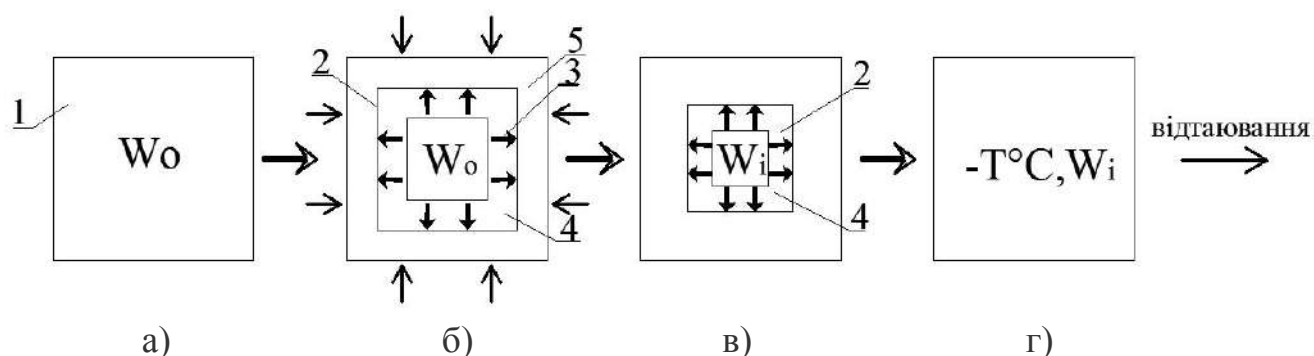


Рис.3.4. Схема формування фронту промерзання при об'ємному заморожуванні зразка: а-г – процес всебічного заморожування зразка;

1 – зразок; 2 – фронт промерзання; 3 – напрямок міграції води; 4 – зона зниженого водонасичення; 5 – зона замерзання; W_0 – водонасичення; W_i – зміна водонасичення

Замерзання вільної води в приповерхневих несучільностях призводить до розвитку інтегральних деформацій та формування фронту промерзання (рис. 3.4.б).

Виникнення зони суцільного замерзання та направленої міграції води в більш холодні ділянки призводить до внутрішнього масопереносу води з глибинних ділянок зразка. Це веде до утворення промерзлої зони зниженого водонасичення до W_1 ($W_0 > W_1$). Фазові переходи води, зміна водонасичення, термічні локальні деформації викликають своєрідні "хвилі" знакозмінних деформацій. Динаміка розвитку таких явищ залежить від кількісного та якісного складів несучильностей, градієнтів температури в різних ділянках зразка, теплопровідності матеріалу в залежності від його водонасичення (рис. 3.4.в).

По мірі переміщення фронту промерзання в глибинні зони зразка зменшується водонасичення матеріалу. Ймовірно, що неповне заповнення водою капілярів та тріщин змінює характер розвитку об'ємних змін як в окремих елементах структури, так і в інтегральних процесах. Можна зробити висновок, що промерзання зразків викликає своєрідне зневоднення їх внутрішнього об'єму до мінімального водонасичення $W_i < W_0$ (рис. 3.4.г). Таким чином, основні процеси, які протікають при замерзанні капілярно-пористих тіл, розвиваються в приповерхневих зонах. Подальший розвиток негативних явищ, пов'язаних з виникненням та розвитком найбільш небезпечних деформацій зсуву, дещо зменшується по мірі переміщення до центру зразка (виробу). На подібний характер руйнування капілярно-пористих матеріалів "від поверхні до центру" звертали увагу багато дослідників [23, 26, 28, 58, 60, 61, 62, 150, 151, 152].

При аналізі літературних джерел про механізми морозного руйнування в матеріалі, було помічено домінування описів циклічного процесу заморожування-відтавання, в той час як механізм відтавання самостійно не розглядався, або розглядався частково. Тому доцільно було розглянути даний процес в кінетиці його розвитку.

Оцінка морозостійкості передбачає багаторазове заморожування та відтавання. Таким чином відтавання слід вважати важливою та невід'ємною складовою, яка забезпечує опір матеріалу дії від'ємних температур. В загальному випадку під відтаванням слід розуміти фазовий перехід льоду в воду. Відтавання льоду проходить за температури $T=0^{\circ}\text{C}$. За такої температури вода здатна

перебувати в трьох агрегатних станах: рідкий, твердий та газоподібний. Процеси, які відбуваються при переході льоду в воду з певним урахуванням парціального тиску, є найменш дослідженими.

Моделювання процесу відтавання починається з підведення тепла до зразка, який має від'ємну температуру $-T^{\circ}\text{C}$ та вологість W_i (стан зразка після заморожування, рис. 3.5.а.).

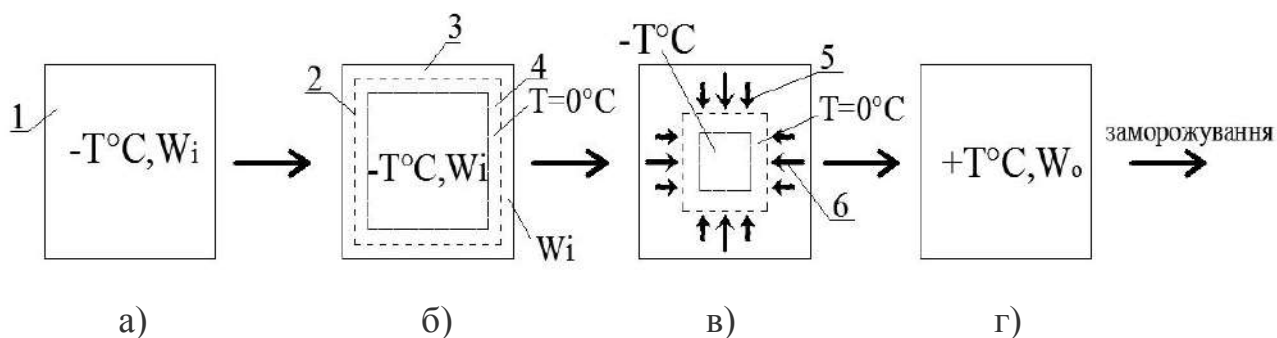


Рис. 3.5. Схема формування фронту відтавання замороженого зразка: а-г – процес всебічного розморожування зразка;

1 – заморожений зразок; 2 – фронт відтавання; 3 – зона зразка з $T > 0^{\circ}\text{C}$; 4 – зона зразка з $T < 0^{\circ}\text{C}$; 5 – напрям переміщення капілярної води; 6 – напрям переміщення вільної води

Підвищення температури зовнішнього повітря до плюсових значень призводить до початку відтавання льоду, який знаходиться у відкритих порах, капілярах та поверхневих тріщинах. Слід відмітити, що відтавання проходить виключно за $T = 0^{\circ}\text{C}$, що забезпечує практично постійний градієнт температур між фронтом відтавання та від'ємною температурою в центрі зразка (рис. 3.5.б).

В даному контексті під фронтом відтавання розуміємо умовну лінію для двомірних моделей, як в нашому випадку, яка відділяє зону сталої вільної води від зони замерзання. В районі фронту відтавання постійна температура $T = 0^{\circ}\text{C}$. По мірі просування фронту відбувається переміщення капілярної вологи до зневоднених при заморожуванні ділянок. Крім того, відбувається міграція води за рахунок виникнення температурних перепадів між температурою поверхні зразка ($+T^{\circ}\text{C}$) та фронтом відтавання ($T = 0^{\circ}\text{C}$) (рис. 3.5.в).

Після просування фронту зникає тиск в капілярах, порах та на берегах тріщин. Вирівнюється тиск в об'ємі капілярів (тріщин) з атмосферним. Нові несучільності, які виникли під дією деформацій зсуву при заморожуванні, заповнюються водою, що веде до загального збільшення водонасичення ($W_i < W_0 < W_0'$). Фронт відтавання зникає при повному переході льоду в воду, що означає готовність зразка до чергового циклу заморожування (рис. 3.5.г).

Проведені дослідження свідчать про те, що процес відтавання впливає на структурні зміни матеріалу, тому його аналіз є доцільним.

Процеси, які протікають в індивідуальних несучільностях різних видів, та інтегральні процеси на рівні зразків з кожним циклом заморожування та відтавання підвищують ймовірність появи нових несучільностей, особливо тріщин, та зміни параметрів існуючих несучільностей. Накопичення несучільностей викликає зміну структури матеріалу та зразка в цілому, що може призвести до зниження морозостійкості. Це ставить задачу виявлення ролі несучільностей в забезпеченні морозостійкості будівельних матеріалів та виробів.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що:

1. Майже всі теорії зменшення морозостійкості засновані на тому, що існує ефект "фронту промерзання". Історично так склалося, що подібний механізм витіснення води був прийнятий як основний при описанні процесів, що відбуваються в окремому капілярі. Якщо прийняти за основу подібний механізм внутрішнього тепло- і масопереносу, то в умовах всебічного заморожування в глибинних зонах зразків (виробів) буде концентруватися значна кількість води, утворюючи "ядро" матеріалу, перенасичене вологою. При повному промерзанні тиск, який виникає при збільшенні обсягу води, повинен привести до руйнування зразка (виробу) зсередини. Але за весь період спостережень за поведінкою будівельних виробів і конструкцій та при вивченні морозостійкості на окремих зразках не було описано вибухонебезпечний характер руйнування за способом "зсередини - назовні".

2. Якщо прийняти до уваги процеси, отримані при моделюванні заморожування зразка в капілярно-пористому тілі, можемо сказати, що внаслідок зміни тиску та температурних градієнтів в моделях буде відбуватися своєрідний процес сушки, або підсос вологи з глибини.

3. Циклічне заморожування та відтавання передбачає багаторазовість. Тому відтавання слід вважати важливою складовою, яка забезпечує опір матеріалу морозному руйнуванню. Під час відтавання зникає тиск в капілярах, порах та на берегах тріщин. Вирівнюється тиск в об'ємі капілярів (тріщин) з атмосферним. Нові несучільності, які виникли під дією деформацій зсуву при заморожуванні, заповнюються водою, що веде до загального збільшення водонасичення, яке буде більше ніж спочатку.

3.2 Роль капілярів при заморожуванні будівельних матеріалів

Розглядаючи бетон як капілярно-пористий матеріал та теорію, представлену Сумгіним М.І. про "фронт промерзання", можна змоделювати роль капіляра при заморожуванні та відтаванні в ньому води.

Явища, які відбуваються в капілярно-пористих матеріалах, і градієнти температурних деформацій окремих компонентів матеріалу призводять до появи розривів (несучільностей, мікротріщин), що може свідчити про початок морозного руйнування. В роботах [28, 57, 59, 60] розглядається зростання тріщини в умовах заморожування і відтавання. Тріщини, як причина морозного руйнування матеріалів, виникають після певної кількості циклів заморожування і відтавання.

Як вже вказувалось раніше, тріщини в композиційний будівельних матеріалах є невід'ємними та активними елементами структури. Як і кожний елемент структури, вони теж сприймають вплив заморожування та відтавання.

Активний вплив тріщин на процеси морозного руйнування передбачає, що в структурі присутні тріщини, в об'ємі яких вода здатна змінювати свій агрегатний стан при зниженні температури нижче $T=0^{\circ}\text{C}$. У свою чергу, температура

фазового переходу води залежить від видів зв'язку води з поверхнею матеріалу. В загальному випадку можна виділити такі форми зв'язку води в твердому тілі [1, 8, 18, 19, 39, 84]:

- хімічно зв'язана вода;
- плівкова або адсорбційно зв'язана вода, яка підрозділяється на міцно зв'язану – мономолекулярну і легко зв'язану – полімолекулярну;
- вільна вода;
- водяна пара, що займає вільний від води обсяг пор і капілярів.

З подальшого розгляду можна виключити хімічно зв'язану воду, оскільки вона входить до складу продуктів новоутворень і не бере участі у фазових переходах при від'ємних температурах.

На даному етапі досліджень тріщини та ВПР сприймаються не як єдина клиновидна тріщина, а як простір в трьох площинах, де всі сторони можуть бути різні та змінювати свій розмір в залежності від зовнішнього впливу.

На рисунку 3.6.а зображено пошкодженість зразка, яка має деяку протяжність. Знаючи, що тріщини та ВПР в більшості випадків не мають геометрично рівних меж, можна змодельовати механізм протікання заморожування в межах тріщини.

Розділимо насичену водою тріщину на 5 ділянок з 5 різними геометричними характеристиками (шириною, довжиною та кутом розкриття), які сполучені між собою (рис. 3.6.б.). Вода в усіх випадках буде існувати в трьох різних фазових стадіях: I – у вільному стані; II – в поліадсорбційному стані; III – в моноадсорбційному стані. Для замерзання води, яка знаходиться в вільному стані, достатньо зменшення температури до $T = 0^{\circ}\text{C}$, в той час як для замерзання води в поліадсорбційному стані – до $T = -24^{\circ}\text{C}$. Для замерзання води в моноадсорбційному стані температура має досягати $T = -75^{\circ}\text{C}$.

В залежності від геометричних характеристик тріщини зона різних стадій відрізняється (рис. 3.6.в).

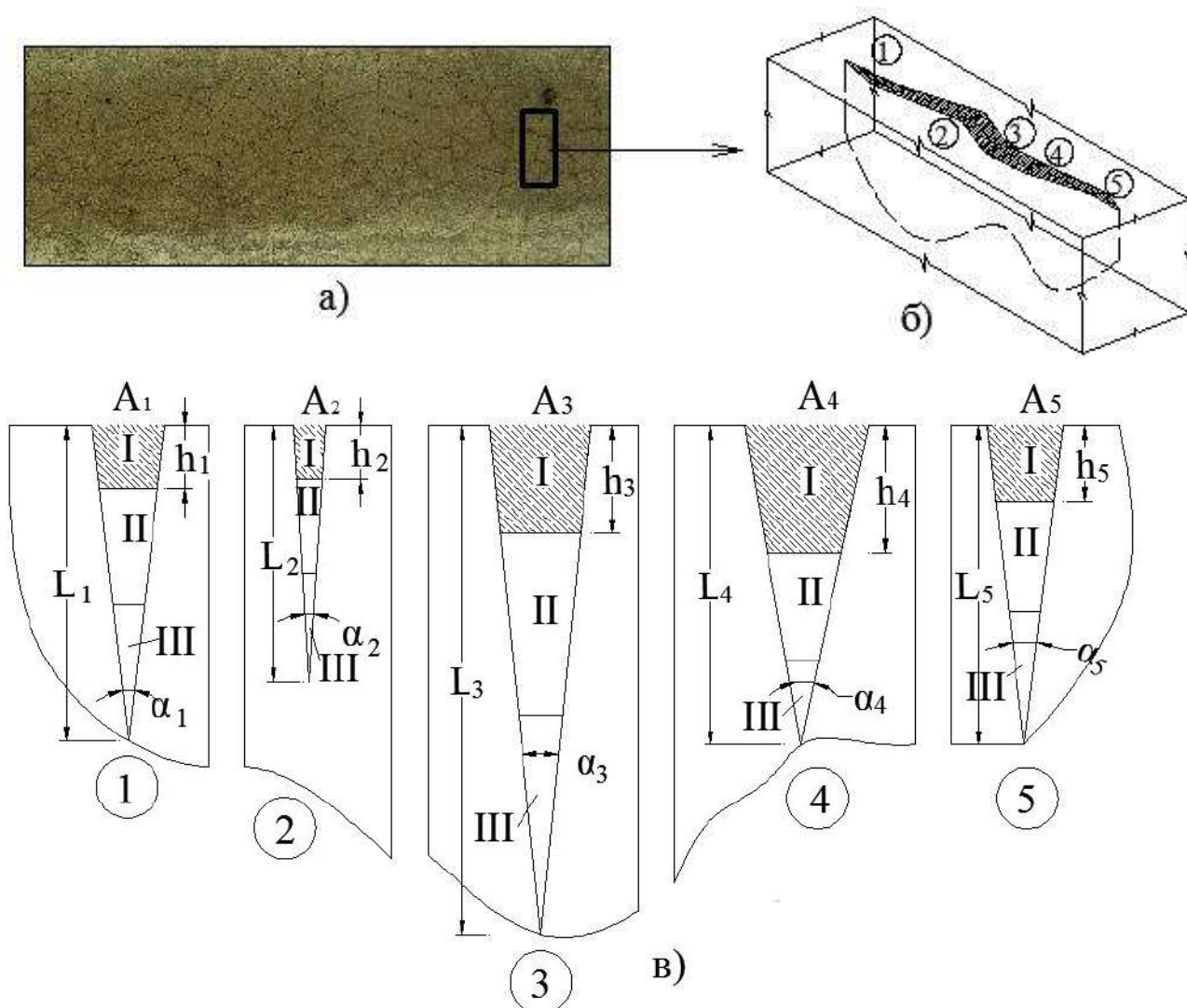


Рис. 3.6. Геометричні характеристики тріщини: 1-5 – різні геометричні характеристики тріщини в різних фрагментах поверхні; а) поверхня виробу (зразка); б) фрагмент поверхні; в) модель тріщини; I – ділянка тріщини, в якій вода знаходиться у вільному стані; II – ділянка тріщини, в якій вода знаходиться в поліадсорбційному стані; III – ділянка тріщини, в якій вода знаходиться в моноадсорбційному стані; A_1-A_n – нумерація берегів тріщини; h_1-h_n – висота ділянки води в n ділянці, в вільному стані; L_1-L_n – довжина тріщини в n ділянці; $\alpha_1-\alpha_n$ – кут гирла тріщини в n ділянці

Тиск відрізняється в різних частинах тріщини в залежності від кількості утвореного льоду (більший обсяг вільної води створюватиме більше льоду, що, в свою чергу, буде збільшувати тиск на поверхню капіляра). Тиск збільшує площу капіляра і частина води, яка знаходилась в поліадсорбційному стані,

перетворюється в вільну. Додатково новоутворений простір утворює зону пониженого тиску, в яку втягується вільна вода з глибинних шарів зразка. Частина моноадсорбційної води перерозподіляється в поліадсорбційну воду.

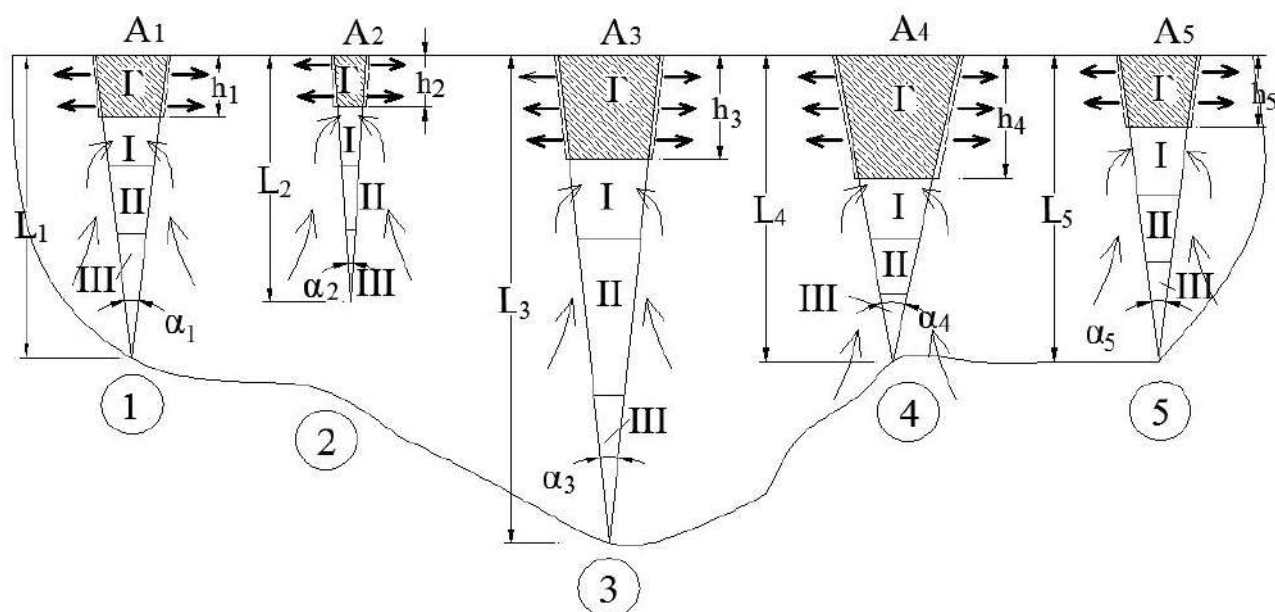


Рис. 3.7. Процеси внутрішнього масопереносу в залежності від геометричних характеристик тріщини: 1-5 – різні геометричні характеристики тріщини в різних фрагментах поверхні; I' – ділянка тріщини, в якій замерзла вода; I – ділянка тріщини, в якій вода знаходиться у вільному стані; II – ділянка тріщини, в якій вода знаходиться в поліадсорбційному стані; III – ділянка тріщини, в якій вода знаходиться в моноадсорбційному стані; A_1 - A_n – нумерація берегів тріщини; h_1 - h_n – висота ділянки води в n ділянці, в вільному стані; L_1 - L_n – довжина тріщини в n ділянці; α_1 - α_n – кут гирла тріщини в n ділянці. Стрілками показаний напрям міграції води

Знакозмінні об'ємні деформації матеріалу, що виникають внаслідок періодичної зміни температури і тиску льоду, ведуть до зміни структури, що, в свою чергу, змінює фізико-механічні властивості цементного каменю і бетону, які знаходяться в зонах дії від'ємних температур.

На рис. 3.8 зображено тріщину в розрізі та проходження фронту промерзання з урахуванням нелінійності геометричних характеристик тріщини. Зміна параметрів тріщини впливає на зміну всього структурного блоку, який, в свою

чергу, змінює параметри структури. Відбувається направлена міграція води за рахунок градієнтів температур. Відомо, що в капілярно-пористих тілах вода переміщується в напрямку ділянок з більш низькою температурою. По мірі переміщення фронту промерзання в глибинні зони зразка зменшується водонасичення матеріалу та виникає ефект висихання зразка. При зміні заморожування з всебічного на одностороннє будуть відбуватися інші процеси. Тому доцільно визначити зміну геометричних параметрів при локальному впливі заморожування та відтавання.

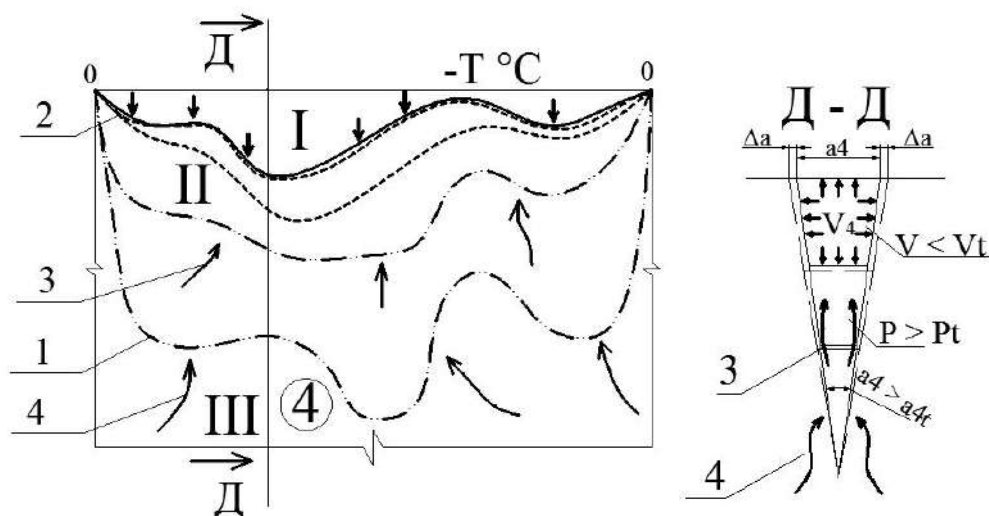


Рис. 3.8. Зміна геометричних параметрів тріщини при заморожуванні в її об'ємі вільної води: а) поздовжній розріз тріщини; б) фрагмент поперечного розрізу тріщини; I, II, III – зони різного стану води; 1 – лінія фронту тріщини; 2 – фронт промерзання; 3 – міграція вологи з нижніх зон об'єму тріщини; 4 – міграція вологи з оточуючого матеріалу; а – ширина розкриття тріщини; α – радіус гирла тріщини; V, P – початкові об'єм та тиск в об'ємі тріщини; V^t, P^t – об'єм та тиск після замерзання вільної води

В підсумку можна зробити висновок, що:

1. Проведений аналіз дозволив дійти висновку, що тріщина є активним елементом, який стимулює внутрішній масообмін та веде до зміни своїх геометричних характеристик за рахунок замерзаючої вільної води. Зміна характеристик тріщини, в свою чергу, веде до структурних змін в матеріалі.

2. Аналіз показав, що процеси, які протікають в об'ємі тріщини при переході води в лід, залежать від геометричних характеристик тріщини. Це сприяє

розвитку градієнтів деформацій вздовж розгалуженого фронту, а також градієнтів внутрішнього масопереносу.

3.3 Однобічне заморожування КМБ як капілярно-пористого тіла

Проведений в розділі 1 аналіз умов експлуатації будівельних конструкцій різного виду і призначення показав, що багато з них сприймають в період експлуатації однобічний або локальний вплив від'ємних температур. При цьому частота впливів пов'язана з добовими і сезонними змінами температури.

Існуючі методики оцінки морозостійкості будівельних матеріалів ґрунтуються на всебічному заморожуванні попередньо зволжених зразків. Однак аналіз умов експлуатації більшості будівельних виробів, конструкцій (огорожувальні конструкції будівель і споруд різного призначення, греблі, облицювання каналів, напірні і безнапірні труби, ЛЕП тощо) показав, що, як правило, зовнішні погодні навантаження діють на них однобічно або локально (рис.3.9). Можна припустити, що при різних типах впливів поведінка матеріалів у виробках буде відрізнятися. Тому була поставлена задача проаналізувати та описати механізм однобічного заморожування.

Даний аналіз проводився методом уявного експерименту. Уявний експеримент – це метод наукового пізнання, який полягає в отриманні нового або перевірці наявного знання шляхом конструювання ідеалізованих об'єктів і маніпулювання ними в штучно (умовно) заданих ситуаціях. Метод уявного експерименту відноситься до області науково-теоретичного знання і являє собою систему уявних, практично неможливо здійснених процедур, що проводяться над ідеальними об'єктами. Уявний експеримент може виступати як самодостатній або розглядатися як "відтворення" майбутнього реального експерименту. Будучи теоретичними моделями реальних ситуацій, уявні експерименти проводяться з метою з'ясування узгодженості основних принципів теорії.



Рис. 3.9. Експлуатація будівельних конструкцій в умовах однобічного (локального) впливу навколишнього середовища

Проведений аналіз основних причин зниження морозостійкості показав, що практично відсутня науково-технічна інформація щодо впливу умов заморожування виробів (зразків) на здатність матеріалу сприймати розвиток деформацій при збільшенні об'єму замерзлої води без руйнування.

Зміна умов заморожування помітно змінює формування фронту промерзання, що веде до зміни внутрішнього тепло- і масопереносу. Це призводить до затискання або витіснення газової складової, виникнення і розвитку вологісних і температурних деформацій тощо.

Як правило, руйнування зразків при всебічному і періодичному заморожуванні і відтаванні відбувається від поверхневих до глибинних шарів матеріалу.

Якщо прийняти за основу подібний механізм внутрішнього тепло- і масопереносу, то в умовах всебічного заморожування в глибинних зонах зразків (виробів) буде концентруватися значна кількість води, утворюючи "ядро" матеріалу, перенасичене вологою. При повному промерзанні тиск, який виникає при збільшенні об'єму води, має призвести до руйнування зразка (виробу)

зсередини. Але в реальних умовах даний описаний вибуховий ефект руйнування за способом "зсередини-назовні" не спостерігався. В більшості випадків деструкція починалась з кутів зразка.

При однобічному впливі, на нашу думку, виникає нерівномірний розподіл внутрішніх деформацій, які виникають в тій частині зразка, що зазнає вплив заморожування та відтавання. В роботах [22, 25, 27] було експериментально доказано, що деформації, які виникають локально, впливають на весь зразок і формують деформаційну "хвилю", що проходить скрізь зразок.

Велику роль в однобічному впливі заморожування та відтавання відіграють капіляри та тріщини. Кожен з типів несучільностей сприймає заморожування та відтавання по-різному і має свою роль. Всі види тріщин в тій чи іншій мірі при заморожуванні та відтаванні змінюють свої власні параметри, що веде до зміни структури всього матеріалу.

Для детального аналізу однобічного заморожування та відтавання було змодельовано механізм протікання даного процесу (рис. 3.10). В аналізі припускаємо, що вода знаходиться в системі несучільностей з загальним водонасиченням W_0 (рис. 3.10.а).

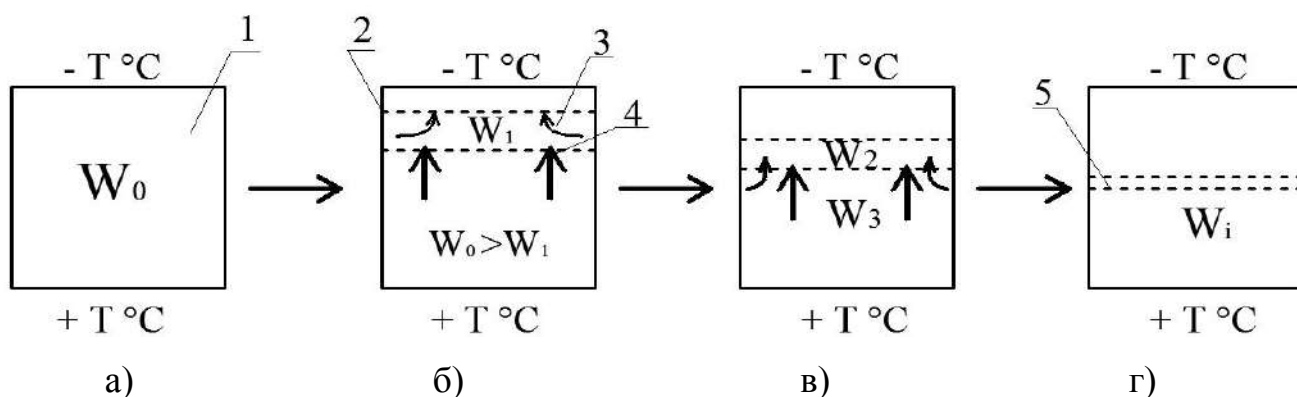


Рис. 3.10. Схема формування фронту промерзання при однобічному заморожуванні зразка

а-г – процес однобічного заморожування зразка; 1 – зразок; 2 – фронт промерзання; 3 – напрямок міграції капілярної води; 4 – напрямок адсорбційно-дифузійного переміщення води; 5 – зона метастабільного стану фронту промерзання

При дії однобічного заморожування та відтавання утворюється однобічний фронт промерзання, який, в свою чергу, ініціює процеси вологопереносу з частини зразка, яка знаходиться в незамерзаючій зоні (рис. 3.10.б). Виникає процес насичення вологою фронту промерзання. Через однобічність даного впливу цей процес не викликає висихання зразків, як при об'ємному впливі, оскільки не виникає ефекту закупореності (рис. 3.10.в,г) [107].

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що прийнятий механізм об'ємного заморожування призводить до зміни внутрішнього тепло- і масопереносу, що в умовах всебічного заморожування буде концентрувати значну кількість води в глибинних зонах зразків, утворюючи "ядро" матеріалу, перенасичене вологою. При повному промерзанні тиск, який виникає при збільшенні об'єму води, має призвести до руйнування зразка (виробу) зсередини. Але за весь час спостережень даний вибуховий характер руйнування не спостерігався.

В більшості випадків деструкція починалась з кутів зразка. При однобічному впливі, на нашу думку, виникає нерівномірний розподіл внутрішніх деформацій, які виникають в тій частині зразка, що зазнає вплив заморожування та відтавання.

3.4 Роль тріщини в морозостійкості матеріалів

Зміна температури замерзання води по довжині клиноподібної тріщини має призвести до розвитку локальних деформацій і пов'язаних з ними змін геометричних характеристик початкових тріщин. У свою чергу, зміна геометричних характеристик ТТ передбачає перерозподіл форм зв'язку води в об'ємі тріщин і розвиток нових (ініційованих) локальних деформацій з черговою зміною геометричних характеристик тріщин. Зміна параметрів початкових тріщин має призвести до зміни опірності матеріалу морозному руйнуванню.

Припущення про здатність матеріалу деформуватися при дії на нього замерзлої води засноване на даних про наявність пластичної складової в

загальних деформаціях будівельних матеріалів при дії зовнішніх навантажень [13] і виявлених залишкових деформаціях КБМ після кожного циклу заморожування і відтавання [28, 52]. Тому була поставлена задача проаналізувати роль різних типів тріщин в матеріалі при проходженні циклів заморожування та відтавання.

Загальна зміна параметрів тріщин передбачає перерозподіл напружень і деформацій, що може привести до необоротного зростання тріщини. На даному етапі досліджень об'єктом аналізу є процеси, що протікають в об'ємі тріщини при замерзанні води, і пов'язані з ними зміни параметрів тріщини.

За даними [26], температурні деформації будівельних матеріалів набагато менші за деформації води при зміні її агрегатного стану. При розгляданні матеріалу як ізотропного властивості температурних деформацій берегів тріщин будуть однаковими і виключені з розгляду.

Основні параметри ТТ представлені на рис. 3.11.а. Розміри основних елементів тріщини (довжина, ширина розкриття, довжина фронту) подані в відносних одиницях, що дозволяє при збереженні співвідношень розглядати "активні" тріщини на різних рівнях структурних неоднорідностей КБМ. Прийmemo, що вільна вода займає третю частину довжини початкової тріщини (рис. 3.11.б).

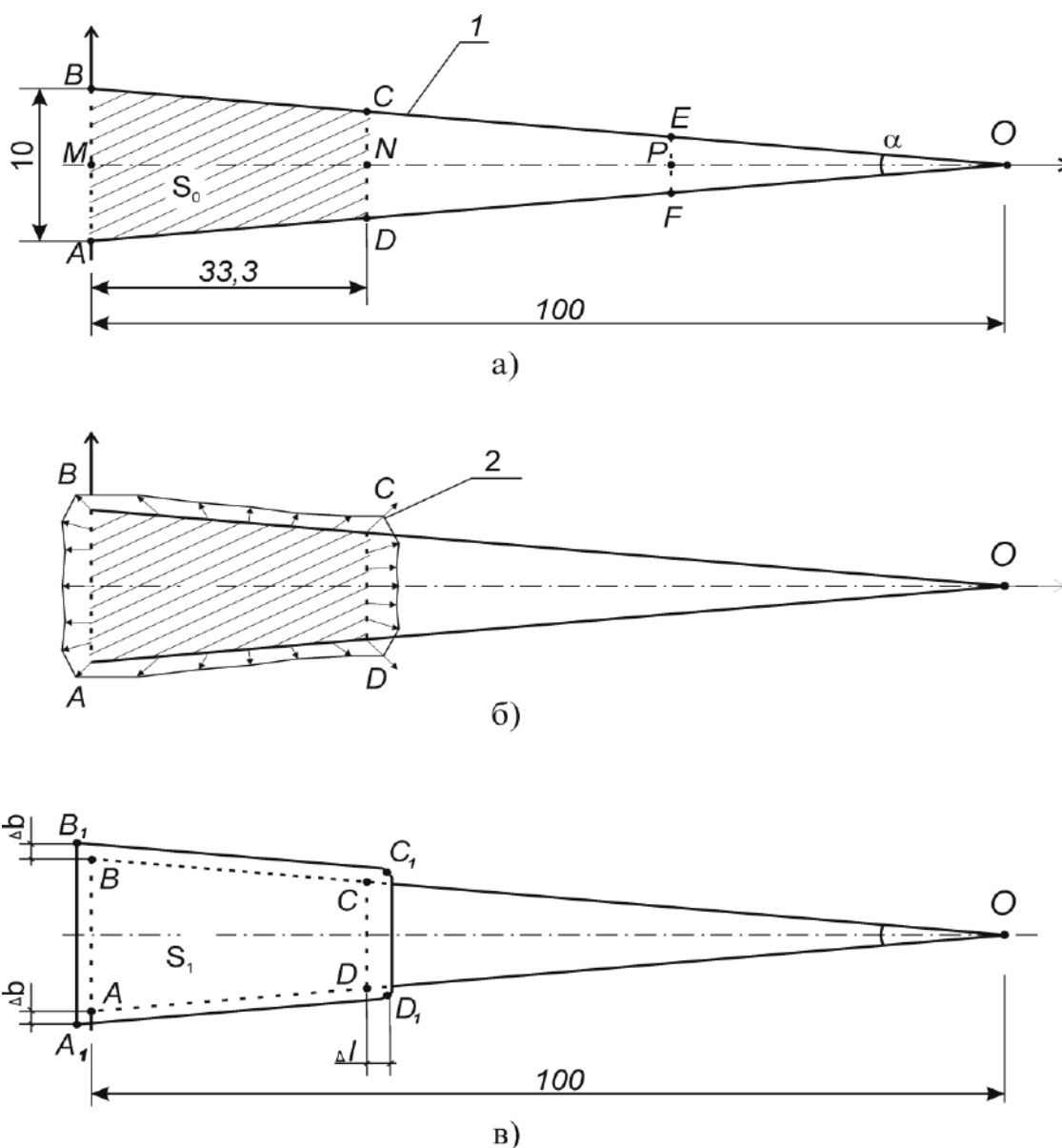


Рис. 3.11. Розподіл деформацій при замерзанні вільної води в тріщині:

а) основні параметри тріщини;

б) схема розподілу деформацій при збільшенні об'єму замерзлої води;

в) параметри тріщини після замерзання вільної води;

1 – береги тріщини; 2 – відносна величина і напрямки деформацій при збільшенні об'єму замерзлої води; α – радіус гирла; S_0 – площа ділянки клиноподібної тріщини, заповненої вільною водою; S_1 – площа ділянки тріщини, заповненої льодом; b – ширина розкриття тріщини

Відомо, що при від'ємних температурах формується фронт замерзання води. При просуванні фронту замерзання змінюється структура утвореного льоду, що викликає збільшення його об'єму. Збільшення об'єму льоду відбувається на ділянці тріщини, що заповнена вільною водою. Вся вільна вода перейшла в твердий стан. В роботах [57, 59, 60] проаналізовано, що початкова геометрія тріщини впливає на характер розподілу об'ємних деформацій (рис. 3.11.в). Тиск, що виникає при замерзанні води, передається на береги тріщини, викликаючи її розкриття.

Збільшення ширини розкриття веде до збільшення площі ділянки початкової тріщини в середньому на 9%. Згідно з прийнятими припущеннями, збільшення ширини розкриття тріщини на межі розділу "лід - порова рідина", може викликати два можливих випадки подальшого розвитку процесів:

- перший випадок пов'язаний зі зміною форми берегів тріщини без збільшення її довжини;
- другий випадок передбачає збільшення довжини тріщини без зміни форми її берегів.

При першій схемі деформування берегів тріщини відбувається збільшення радіусу гирла. Площа ділянки тріщини, незаповненої льодом, також збільшується.

Для другого випадку характерна зміна довжини тріщини без зміни радіуса її гирла (рис. 3.12.б).

Зміна форми берегів тріщини відбувається за рахунок пластичних деформацій матеріалу на його межі з льодом (утворення своєрідного шарніру). Схема зміни форми берегів тріщини представлена на рис. 3.12.а.

Загальним для двох розглянутих можливих випадків зміни параметрів початкової тріщини під дією тиску льоду можна вважати збільшення площі ділянки тріщини, незаповненої льодом.

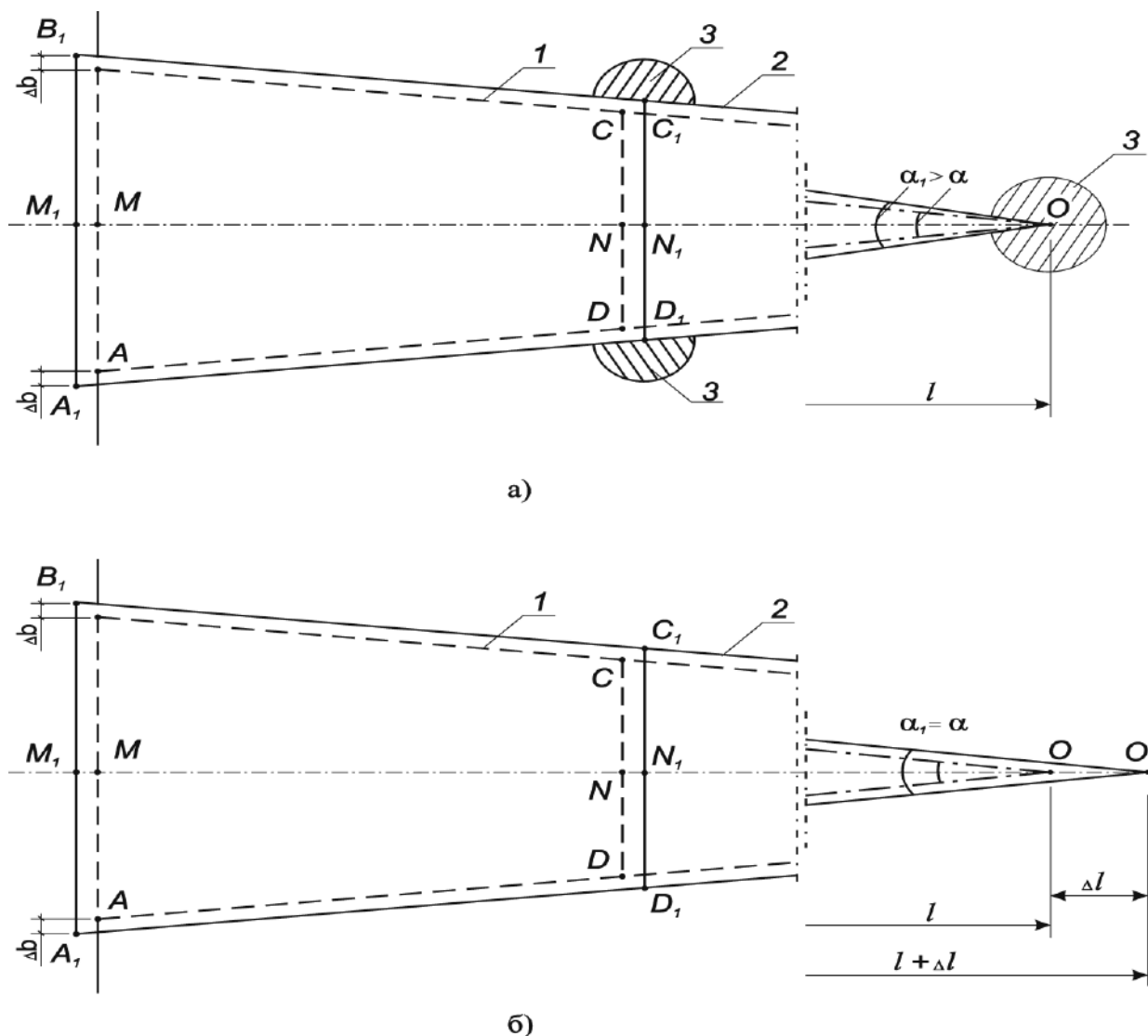


Рис. 3.12. Схема зміни параметрів тріщини при замерзанні в її об'ємі вільної води:

а) деформування берегів тріщини;

б) збільшення довжини тріщини;

1 – береги початкової тріщини; 2 – береги тріщини після деформування; 3 – зони пластичного деформування

Збільшення ширини розкриття викликає збільшення об'єму ділянки тріщини, що заповнена зв'язаною водою.

Зниження тиску в об'ємі ділянки тріщини, що заповнена зв'язаною водою, веде до спонтанного перерозподілу форм зв'язку води. Можна припустити, що за рахунок зниження порціального тиску частина поліадсорбційної води буде

переходити у вільний стан. При цьому вільна вода буде акумулюватися в ділянці тріщини з максимальною шириною розкриття – на межі з льодом. Крім того, взявши до уваги, що матеріал, в якому знаходиться тріщина, є заповненою водою капілярно-пористою системою, можна зробити висновок про підсос частини капілярної рідини в об'єм тріщини. Принципова схема внутрішнього масопереносу і вологообміну представлена на рис. 3.13.

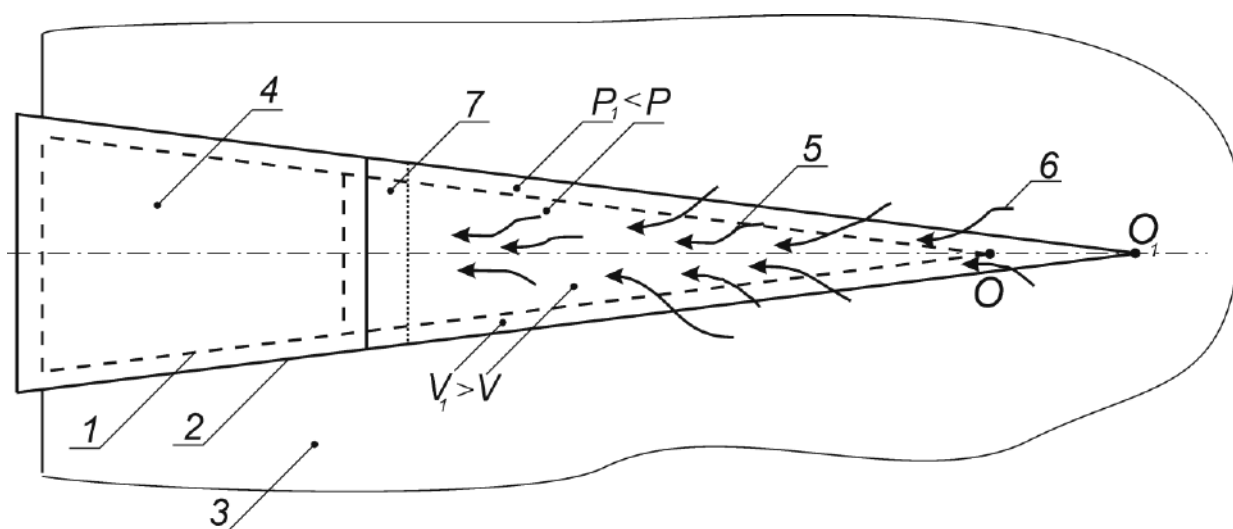


Рис. 3.13. Принципова схема внутрішнього масопереносу і вологообміну
 1 – початкова тріщина; 2 – тріщина після замерзання в ній води; 3 – капілярно-пористий матеріал, насичений водою; 4 – лід; 5 – перехід зв'язаної води в вільну; 6 – міграція вологи в об'єм тріщини під дією градієнтів тиску; 7 – зона конденсації вільної води

Таким чином ділянка тріщини, що примикає до льоду, заповнюється переохолодженою вільною водою, яка, замерзаючи, збільшується в об'ємі. Відбувається черговий етап збільшення ширини розкриття тріщини і зміни тим самим її параметрів.

Більш складна картина розподілу деформацій при замерзанні води відбувається в ТТ, що мають бічні відгалуження.

Вище описаний механізм внутрішнього масопереносу і вологообміну та зміна параметрів тріщини при замерзанні в її об'ємі вільної води. Але на цьому не закінчується роль тріщин в процесі заморожування матеріалу (конструкції).

Кожен з вищеперерахованих типів тріщин сприймає заморожування та відтавання по-різному і має свою роль. Всі види тріщин в тій чи іншій мірі при заморожуванні та відтаванні змінюють свої параметри, що веде до зміни структури всього матеріалу. При впливі на тріщини деформацій відбувається збільшення довжини тріщини аж до їх перетворення у внутрішні поверхні розділу. Цей процес зменшує напруження, що концентрувалися в гирлі тріщини, при цьому зменшуючи внутрішні напруження всього зразка.

Отримані внутрішні поверхні розділу частково відіграють роль деформаційного шву (демпферу) в зразку або конструкції, тобто при зміні температури частина деформацій затухає на зоні контакту ВПР, збільшуючи, таким чином, стійкість до морозного руйнування.

Оскільки реакція тріщини та інших несучильностей при зміні типу впливу заморожування та відтавання буде відрізнятися, то доцільно було змоделювати зміну геометричних характеристик при однобічному впливі.

Отримані результати та візуалізація показали, що розподілення тиску при однобічному та об'ємному заморожуванні відрізняється. З того боку, з якого відбувалося промерзання, лід має прозорий характер, а з утепленого боку лід має в своєму об'ємі повітря та інші частки. Тобто механізм заморожування при локальному впливі виглядає так: на початку заморожування вода кристалізується з того боку, з якого йде від'ємна температура; подальше перетворення води на лід пов'язане зі збільшенням об'єму льоду та витісненням води та повітря у бік, паралельний проходженню від'ємної температури. Найбільша відмінність об'ємного впливу від локального полягає в тому, що при локальному впливі тиск групується на одній стінці капіляра, а при об'ємному – на куті капіляра.

На нашу думку, тиск, який виникає на куті, є більш небезпечним для стійкості конструкції, ніж той, що групується на одній стінці капіляра.

Розсіювання тиску на стінці капіляра проходить більш рівномірно, ніж тиску, сконцентрованого в куті.

Аналіз дозволяє зробити висновок, що вже після першого циклу заморожування відбувається зміна геометричних характеристик ТТ. Початкові (технологічні) тріщини переходять в експлуатаційні тріщини (ЕТ). Подальший розвиток ЕТ зумовлюється формою, розміром, кількістю і орієнтуванням ТТ. В силу того, що технологічні тріщини віднесені до елементів структури композиційних будівельних матеріалів, то можна зробити висновок, що зміна параметрів початкових тріщин відображає загальні структурні зміни на різних рівнях структурних неоднорідностей при заморожуванні КБМ. Крім того, процеси і явища, які відбуваються в об'ємі тріщин при замерзанні вільної води, ініціюють комплекс явищ і процесів, які відбуваються в оточуючому матеріалі.

Взаємозумовленість деформаційних процесів, викликаних замерзанням вільної води в об'ємі початкових тріщин, має визначати здатність матеріалу чинити опір знакозмінним морозним навантаженням.

Проведений аналіз і дослідження дозволяють зробити висновок, що при замерзанні вільної води, яка займає частину об'єму початкової тріщини, лід збільшується в об'ємі та тисне на береги, що веде до збільшення ширини розкриття тріщини. При цьому може відбуватися зміна форми берегів або збільшення довжини тріщини. В обох випадках відбувається збільшення об'єму тріщини, що посилює протікання внутрішніх процесів вологообміну та масопереносу і сприяє розвитку чергового етапу зміни параметрів початкової тріщини.

3.5. Вплив умов заморожування-відтавання на характер розвитку об'ємних деформацій в зразках

При аналізі умов експлуатації більшості будівельних конструкцій і виробів та нормативних методів визначення характеристик будівельних матеріалів можна побачити певну неузгодженість, особливо при розгляданні морозостійкості. Вона

полягає в тому, що будівельні конструкції в більшості випадків сприймають однобічний вплив від'ємних температур, тоді як нормативні документи передбачають визначення морозостійкості методом об'ємного заморожування та відтавання.

Відомо, що морозостійкість будь-якого капілярно-пористого матеріалу, включаючи будівельні матеріали на неорганічних в'язучих, визначається характером пористості, від якої залежить руйнівна роль води при її фазовому переході в твердий стан в порах та капілярах. Крім того, при від'ємній температурі проходять два взаємно протилежні процеси: зменшення об'єму твердої складової матеріалу при значному збільшенні об'єму незв'язаної води. У випадку, якщо замерзає тільки частина виробу (зразка, конструкції), об'ємні зміни при замерзанні будуть відбуватися тільки в зоні морозу. Це викликає ще одну неузгодженість між об'єктивними умовами експлуатації виробів і конструкцій та діючими методами оцінки морозостійкості матеріалів, з яких виготовлені ці вироби та конструкції. Процес відтавання матеріалу, в порівнянні з процесом заморожування, менш досліджений, хоча він є невід'ємною частиною при визначенні морозостійкості. Це поставило задачу оцінити вплив умов зволоження, заморожування та відтавання на характер розвитку об'ємних інтегральних деформацій в будівельних виробках.

Об'єктом аналізу були прийняті зразки розміром $a \times a \times 4a$. Розподіл переміщень окремих точок на зовнішніх гранях зразків аналізувався за допомогою графоаналітичного методу. Вивчалися переміщення характерних точок при проходженні циклічного заморожування та відтавання. Було досліджено два типи моделей: з об'ємним типом заморожування-відтавання та з локальним (рис. 3.14.а,б).

Запропонований метод дозволяє побудувати епюри деформацій для будь-яких моделей з урахуванням їх геометричних характеристик.

При аналізі графоаналітичним методом матеріал розглядався як ізотропна і безперервна середа. Передбачалося, що об'ємні деформаційні процеси виявлялися на зовнішніх кордонах виробу і що величина деформацій матеріалу пропорційна

його об'єму. При цьому кожна точка, що лежить на поверхні розділу, взаємодіє з усіма точками, які належать своїй поверхні розділу, і з усіма "видимими" точками на поверхні зразка і на межі розділу з пустотами.

У кожній моделі величина переміщення точки, що належить осі x (в нашому випадку точка 7), була прийнята за одиницю $l_7=1$. Прийнята методика дозволяє якісно оцінити зміну характеру розподілу залишкових деформацій з виділенням таких параметрів як відносна величина деформацій l і спрямування їх дії через кут φ .

Введення системи координат дозволило побудувати абсолютний напрямок переміщень всіх точок моделей з урахуванням їх геометричних особливостей. Для кількісної оцінки отримані результативні переміщення всіх точок були приведені до одного масштабу [57].

Переміщення точок починається при попередньому зволоженні зразків. На рис. 3.15 показані переміщення точок (об'ємні зміни), як для всебічного, так і для локального впливу. При зволоженні виникає процес набухання, точки зміщуються на відносну величину відповідно до геометричних характеристик зразка.

Отримані дані показують, що в залежності від умов зволоження змінюється загальний вигляд розподілу деформацій в зразках (рис. 3.15). При об'ємному зволоженні максимальна зміна напрямку переміщень досягає 37° для точки 1 по відношенню до точок 2 та 24. Аналогічні результати для точки 13 по відношенню до точок 12 та 14. При цьому напрям переміщень точок 2 і 24 та 12 і 14 прямопротилежний. Подібний градієнт напрямку переміщень закладає підґрунтя зародження деформацій зсуву. Змінюється також відносна величина переміщень – переміщення точок 1 та 13 в п'ять разів менше порівняно з переміщеннями точок 6, 7, 8, 18, 19, 20.

Кількісні значення переміщень характерних точок в залежності від умов зволоження представлені в табл. 3.1.

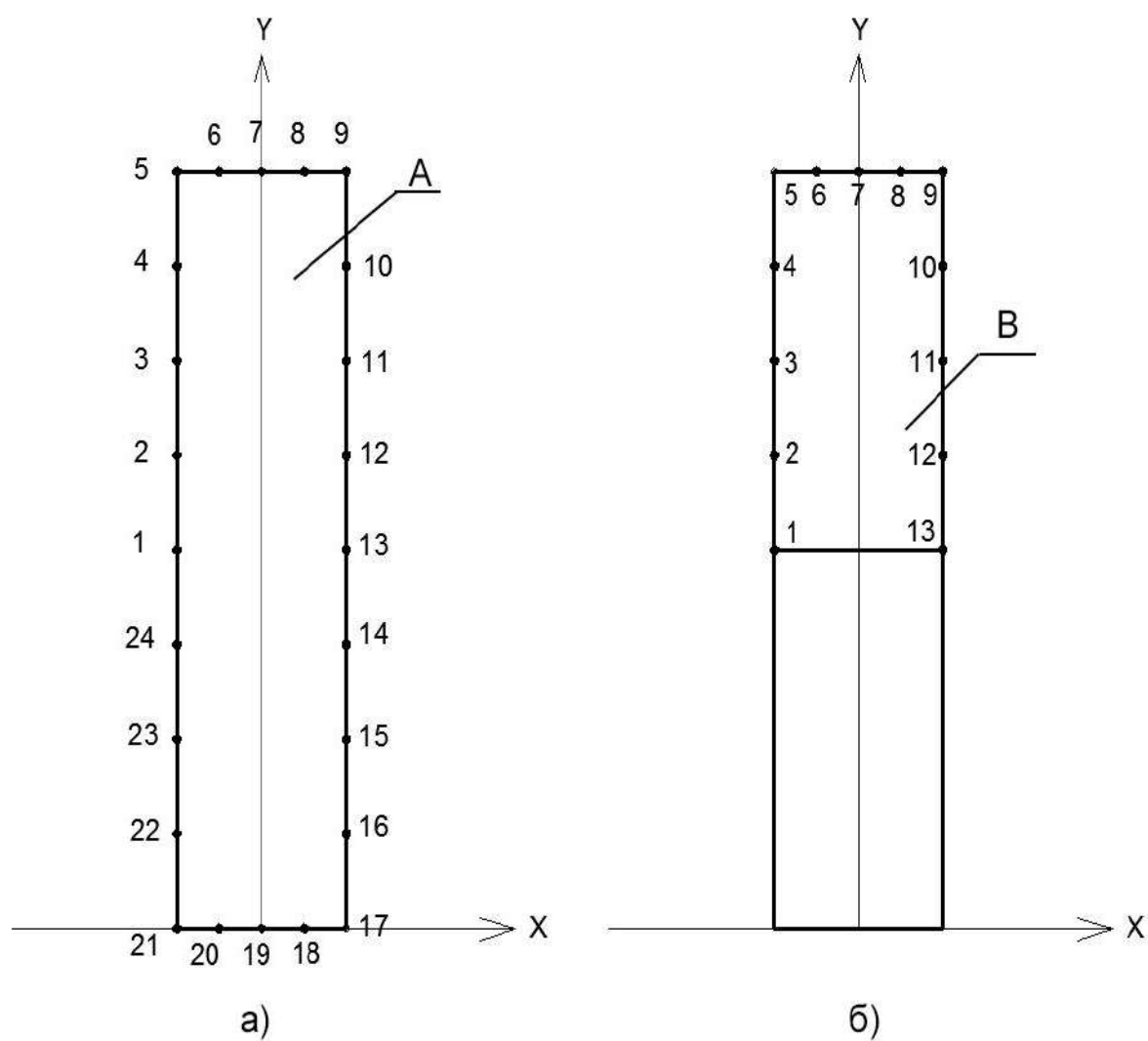


Рис. 3.14. Початкове положення характерних точок при аналізі впливу умов заморожування-відтавання на об'ємні зміни зразків:

а – для об'ємного впливу;

б – для однобічного впливу;

1-24 – характерні точки на гранях зразків; А – зразок; В – зона однобічного впливу

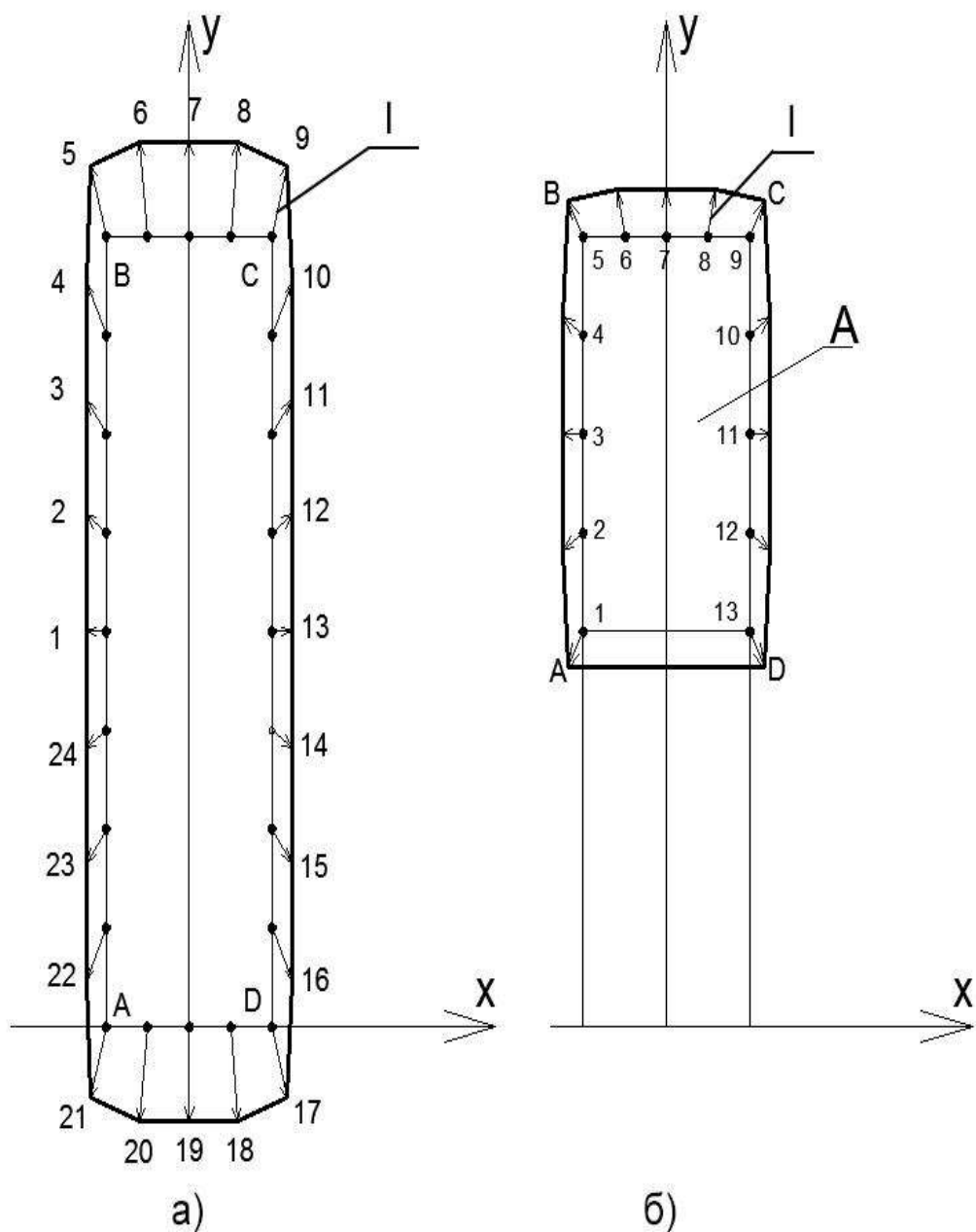


Рис. 3.15. Вплив умов зволоження на переміщення характерних точок на зовнішніх гранях зразків:

а – об'ємне зволоження;

б – однобічне зволоження;

1-24 – характерні точки; I – напрям та відносна величина переміщень характерних точок; А – зона однобічного зволоження

Таблиця 3.1

Кількісні значення переміщень характерних точок в залежності від умов попереднього зволоження для першого циклу заморожування-відтавання

Умови зволоження				
Об'ємне			Однобічне	
Відносна величина переміщень точок, ϵ	Напрямок переміщень характерних точок, φ°	Точки	Відносна величина переміщень точок, ϵ	Напрямок переміщень характерних точок, φ°
0,25	0	1	0,84	63
0,31	37	2	0,63	37
0,45	56	3	0,50	0
0,61	66	4	0,63	37
0,77	76	5	0,84	63
1,01	95	6	1,02	101
1,00	90	7	1	90
1,01	85	8	1,02	79
0,77	76	9	0,84	63
0,61	66	10	0,63	37
0,45	56	11	0,50	0
0,31	37	12	0,63	37
0,25	0	13	0,84	63
0,31	37	14		
0,45	56	15		
0,61	66	16		
0,77	76	17		
1,01	95	18		
1,00	90	19		
1,01	85	20		
0,77	76	21		
0,61	66	22		
0,45	56	23		
0,31	37	24		

Після зволоження зразки заморожуються, що супроводжується зменшенням об'єму матеріалу та всього зразка. Графоаналітичний метод дозволяє прослідкувати зміну напрямку та величину деформацій в моделі в залежності від умов заморожування (рис. 3.16).

Зміна окремих кутів розкриття деформації при однобічному та об'ємному впливі зображена за допомогою графоаналітичного методу на рис. 3.17.

В більшості випадків кут розкриття деформації при об'ємному впливі заморожування менший чи рівний куту з аналогічної точки при локальному впливі. Але для точки 1 та 13 кут нахилу різниться: при однобічному впливі він більший на 63° за кут при об'ємному впливі.

Аналіз кутів розкриття деформації при різних типах впливів дозволяє прослідкувати розподіл деформацій в залежності від виду впливу заморожування та виділити найбільш небезпечні зони, які дають підґрунтя для зародження деформацій зсуву.

Таким чином, виникаючі градієнти по напрямку та відносній величині переміщень при об'ємному заморожуванні закладають підґрунтя нерівномірного розподілу виникаючих об'ємних деформацій, що, разом з локальними процесами, які розвиваються в порах та капілярах при замерзанні в них вільної води, спроможні призвести до незворотних змін в структурі зразка.

Вищеописане моделювання було здійснено для одного циклу заморожування. Для більш об'єктивного моделювання процесів деформацій, що виникають при різних типах впливу заморожування-відтавання, було прийнято рішення провести аналіз після ще одного циклу заморожування. Аналіз епюр технологічних деформацій для двох циклів при різних типах впливу заморожування та відтавання представлений на рис. 3.18, 3.19

Після попереднього зволоження відносна величина переміщень точок в моделі з об'ємним впливом (рис. 3.18.а) збільшилась в середньому на 51%. В моделі з локальним впливом показник ϵ збільшився на 16% (рис.3.19.а).

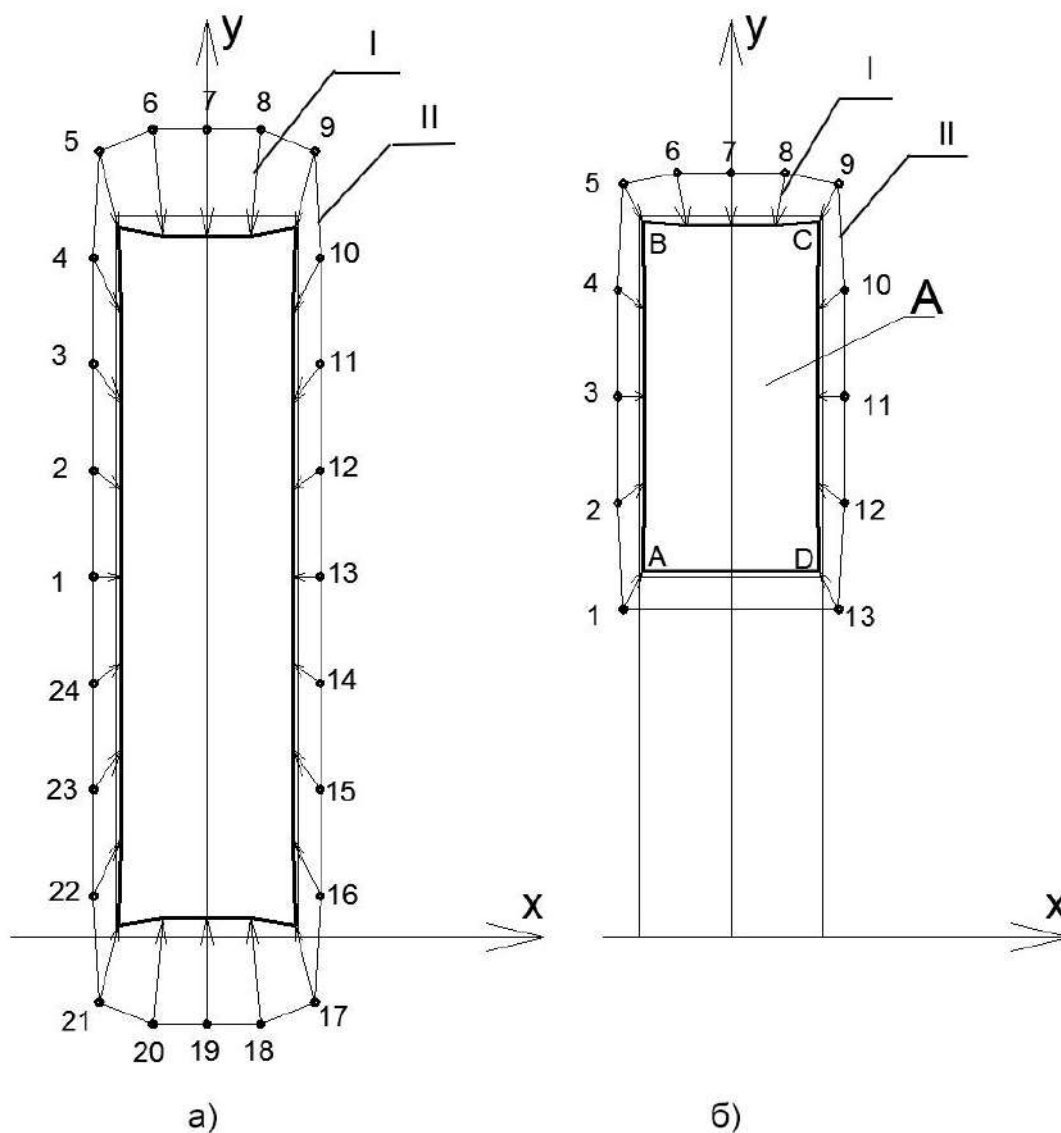


Рис. 3.16. Розподіл деформацій при зменшенні об'єму зразків:

а – об'ємне заморожування;

б – однобічне заморожування;

1-24 – характерні точки; I – напрям та відносна величина переміщень характерних точок; II – зовнішні границі зразків після їх замерзання

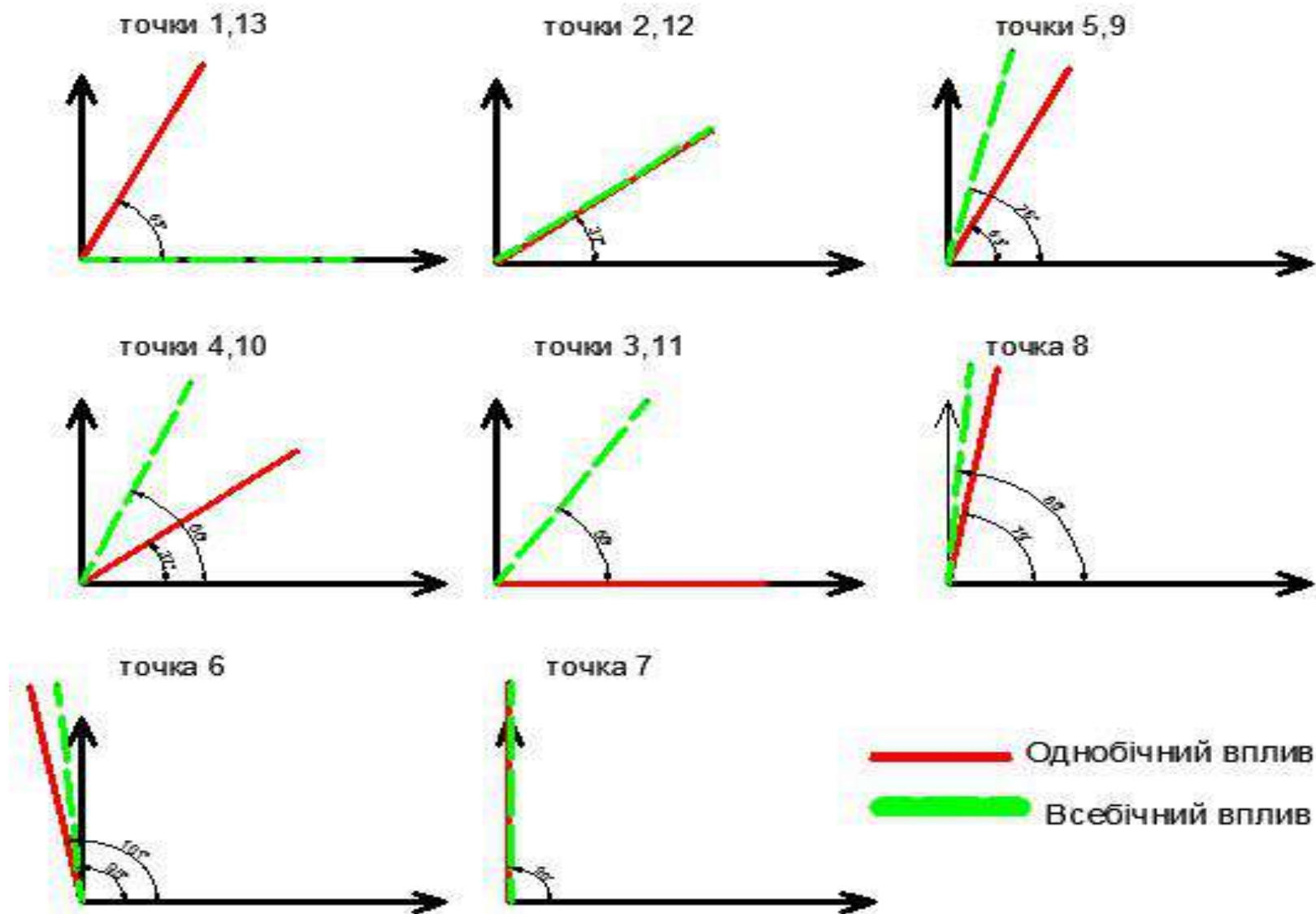


Рис. 3.17. Зміна кутів розкриття деформації при однобічному та об'ємному впливі після заморожування та відтавання

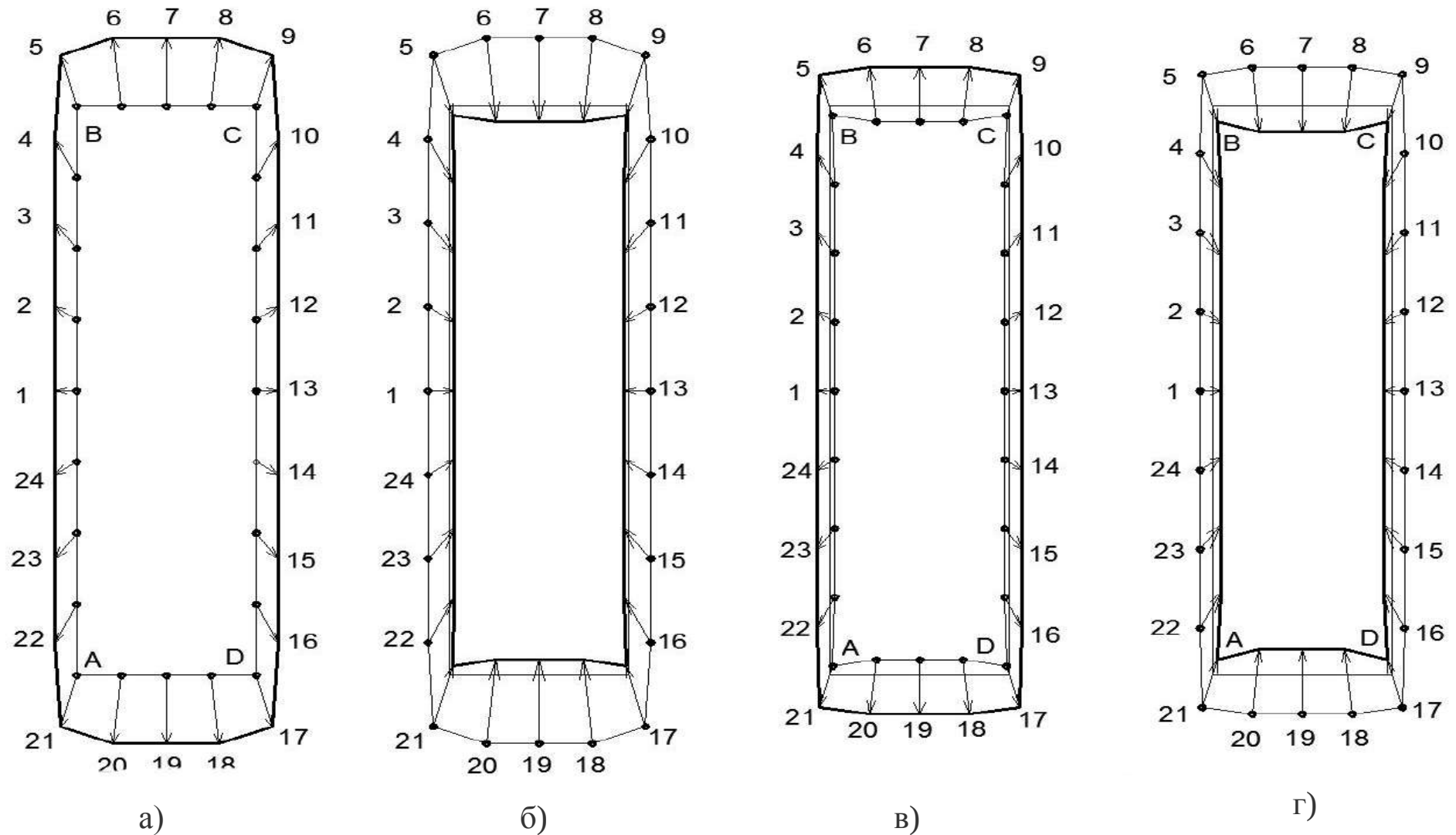


Рис. 3.18. Епюри технологічних деформацій, розташованих на поверхні зразка, в моделях-балочках при об'ємному впливі після n циклів: а) зволоження; б) заморожування; в) відтавання; г) заморожування

В подальшому процесі заморожування моделі з об'ємним та локальним впливом зменшили величину переміщень точок в середньому на 10% та 4% відносно початкових точок (рис. 3.20).

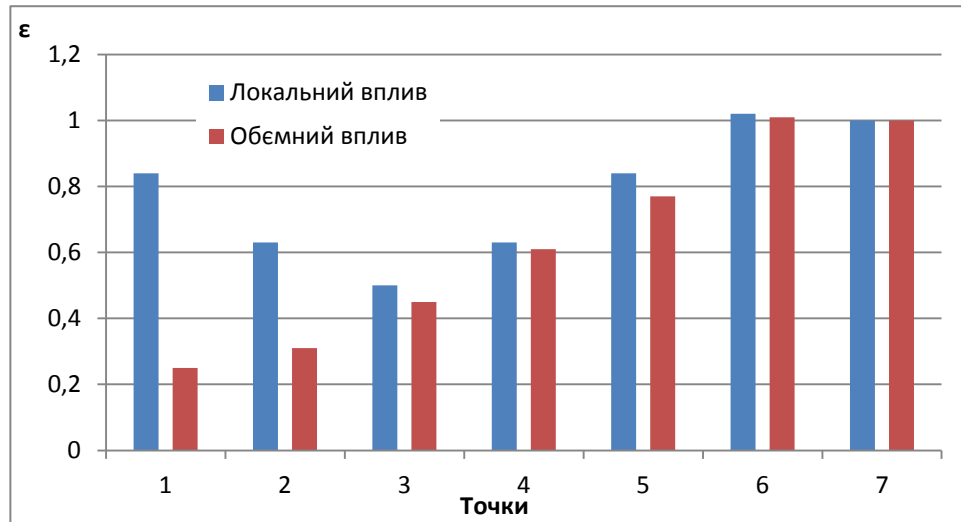


Рис. 3.20. Відносна величина переміщень точок при різних типах впливів

Після першого заморожування зразки відтаювали у розчині, в процесі чого відбувались переміщення характерних точок, відносна величина та напрям яких наведені в табл. 3.2.

Другий цикл заморожування та відтавання дав змогу визначити зміну величин переміщень точок з урахуванням епюр деформацій, які залишились після першого циклу заморожування.

В моделі з всебічним впливом при відтаюванні у розчині показник ϵ збільшився на 28% (рис. 3.18.в), а при локальному впливі – на 11% (рис. 3.19.в).

Величина переміщень точок в подальшому процесі заморожування для зразків із всебічним впливом зменшилась на 16%, а з локальним впливом – на 6% (рис. 3.18-19.г) відносно початкових точок (рис. 3.14).

Збільшення кількості циклів призводить до зміни відносної величини переміщень точок. Для об'ємного впливу різниця між відносною величиною переміщень точок після початкового замочування та після зволоження у розчині складає 18% та для локального 7%.

Таблиця 3.2

Кількісні значення переміщень характерних точок в залежності від умов заморожування після двох циклів заморожування-відтавання

Умови заморожування				
Об'ємне			Однобічне	
Відносна величина переміщень точок, ε	Напрямок переміщень характерних точок, φ°	Точки	Відносна величина переміщень точок, ε	Напрямок переміщень характерних точок, φ°
0,25	63	1	0,84	63
0,31	37	2	0,63	37
0,44	56	3	0,50	0
0,60	66	4	0,63	37
0,74	76	5	0,84	63
1,00	95	6	1,02	101
1,00	90	7	1	90
1,00	85	8	1,02	79
0,74	76	9	0,84	63
0,60	66	10	0,63	37
0,44	56	11	0,50	0
0,31	37	12	0,63	37
0,25	63	13	0,84	63
0,31	37	14		
0,44	56	15		
0,60	66	16		
0,74	76	17		
1,00	85	18		
1,00	90	19		
1,00	95	20		
0,74	76	21		
0,60	66	22		
0,44	56	23		
0,31	37	24		

Проведений аналіз дав змогу визначити, що вже після одного циклу заморожування зразки не повертаються в свій первинний стан, що можна побачити з аналізу розміщення початкових точок на рис. 3.18, 3.19. Можна

припустити, що вже після першого циклу настають незворотні зміни, які після кожного наступного циклу накопичуються.

Проведений аналіз показав, що в моделі, в залежності від виду впливу, формується індивідуальний характер розподілу деформацій (табл. 3.1 і табл. 3.2).

Виникаючі градієнти деформацій викликають зміну форми зовнішньої границі моделі (рис. 3.15). Викривлення зовнішньої границі створює умови концентрації різноспрямованих деформацій в місцях максимальної зміни форми.

В результаті аналізу різного типу впливу заморожування та відтавання на зміну відносної величини переміщень точок можна побачити, що зразки, які проходили цикли заморожування-відтавання при локальному впливі, мали коефіцієнт деформації більший, ніж при об'ємному впливі. Зміна відносної величини переміщень при об'ємному впливі має нелінійний характер, в той час як при локальному впливі спостерігається більш лінійний характер (рис. 3.20).

Проведений графоаналітичним методом аналіз показує, що різні за значенням і напрямом деформації, які виникають в процесі різного типу впливу заморожування та відтавання матеріалу на поверхнях розділу, викликають їх постійну формозміну. Градієнти деформацій за величиною і напрямом визначають формування розподілу деформацій на наступних циклах заморожування та відтавання. При цьому в деяких точках поверхонь виробів напрямок дії деформацій змінюється в залежності від типу впливу (рис. 3.17).

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що:

1. Проведений графоаналітичним методом аналіз показав, що характер розподілу технологічних деформацій залежить від типу впливу заморожування-відтавання і ця залежність зберігається незалежно від кількості циклів заморожування-відтавання. При кожному типі впливу виникає індивідуальний характер розподілу деформацій. Збільшення циклів заморожування-відтавання не змінює напрям деформації, але відносна величина деформації збільшується з кожним циклом.

2. Проаналізувавши кути розкриття деформації, можна побачити, що вони також залежать від виду впливу заморожування-відтавання. Значення кутів не

залежить від кількості циклів, але при об'ємному впливі кути розкриття деформації в основному більші, ніж при локальному впливі.

3. Отримані результати показують, що в залежності від умов заморожування змінюється загальний вигляд розподілу деформацій в зразках. При об'ємному заморожуванні максимальна зміна відносної величини переміщень більша, ніж при локальному.

4. Аналіз показав, що вже після одного циклу заморожування-відтавання зразки не повертаються в свій первинний стан. Збільшення кількості циклів змінює величину деформації. При об'ємному впливі різниця між величинами деформації після першого циклу заморожування-відтавання та другого циклу майже в два рази більша, ніж при локальному впливі. Можна припустити, що вже після першого циклу настають незворотні зміни, які після кожного циклу накопичуються.

Висновки за 3-м розділом

1. Теорії зменшення морозостійкості майже всі засновані на тому, що при збільшенні об'єму води, при її переході в твердий стан, лід тисне на ще вільну воду в капілярах, що призводить до переміщення води в глибинні зони зразка, яке має привести до руйнування зразка (виробу) зсередини.

При вивченні морозостійкості капілярно-пористих тіл було виявлено, що замерзання вільної води в приповерхневих несучільностях призводить до розвитку інтегральних деформацій та формування фронту промерзання. Виникнення зони суцільного замерзання та направленої міграції води в більш холодні ділянки призводить до внутрішнього масопереносу води з глибинних ділянок зразка. Таким чином, основні процеси, які протікають при замерзанні капілярно-пористих тіл, розвиваються в приповерхневих зонах. Подальший розвиток негативних явищ, пов'язаних з виникненням та розвитком найбільш небезпечних деформацій зсуву, зменшується по мірі переміщення до центру зразка (виробу). Тобто руйнування "зсередини - назовні" не відбувається.

2. Замерзання вільної води у тріщинах призводить до внутрішнього масообміну, що веде до зміни їх геометричних характеристик. Зміна геометричних характеристик тріщин веде до структурних змін в матеріалі. При цьому тріщина розглядається не як єдина клиновидна, а як простір в трьох площинах, що дало змогу представити фронт промерзання як непрямолінійний (струмкового типу) .

3. При дії однобічного заморожування та відтавання утворюється однобічний фронт промерзання, який, в свою чергу, ініціює процеси вологопереносу з частини зразка, яка знаходиться в незамерзаючій зоні. Виникає процес насичення вологою фронту промерзання. Через однобічність даного впливу цей процес не викликає висихання зразків, як при об'ємному впливі, оскільки не виникає ефекту закупореності.

4. Розподілення тиску в капілярі при однобічному та об'ємному заморожуванні відрізняється. Найбільша відмінність об'ємного впливу від локального полягає в тому, що при локальному впливі тиск групується на одній стінці капіляра, а при об'ємному – на куті капіляра. Тиск, який виникає на куті, є більш небезпечним для стійкості конструкції, ніж той, що групується на одній стінці капіляра. Розсіювання тиску на стінці капіляра проходить більш рівномірно, ніж тиску, сконцентрованого в куті.

5. Графоаналітичний метод дав змогу оцінити зміну об'ємних деформацій в залежності від виду впливу заморожування-відтавання та наглядно побачити, що при різних видах впливу картина розподілу деформацій різна. При локальному впливі величина деформацій значно менша ніж при об'ємному.

Аналіз показав, що вже після одного циклу заморожування-відтавання зразки не повертаються в свій первинний стан. Збільшення циклів призводить до різниці в зміні величини деформації. Для об'ємного впливу ця різниця є майже в два рази більшою, ніж для локального. Можна припустити, що вже після першого циклу настають незворотні зміни, які після кожного циклу накопичуються.

6. Результати досліджень, що викладені у даному розділі, опубліковані у роботі [107].

РОЗДІЛ 4

ВПЛИВ УМОВ ЗАМОРОЖУВАННЯ НА ЗМІНУ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ ТА РОЗЧИНУ

4.1. Вплив умов заморожування на зміну коефіцієнта пошкодженості цементного каменю

Проведений аналіз механізмів морозного руйнування будівельних композитів (розділ 3) показав, що при замерзанні води в об'ємі тріщини остання змінює свої розміри або на її берегах можуть виникати (зароджуватися) нові тріщини. Це веде до зміни загальної пошкодженості матеріалу, що має позначитися на зміні його властивостей. Проведені дослідження показали, що зміна умов заморожування веде до формування фронтів промерзання, що, в свою чергу, викликає зміну внутрішнього масопереносу.

Одним з ефективних методів кількісної оцінки зміни структури слід вважати оцінку зміни коефіцієнтів пошкодженості при різних способах заморожування зразків. Тріщини є об'єктивно існуючими елементами структури, які в значній мірі визначають рівень властивостей бетону і умови безпечної роботи залізобетонних конструкцій [24, 53]. Тріщини та поверхні розподілу віднесені до активних складових системи, в якій вони знаходяться. Тобто вони сприймають зовнішні впливи та адекватно реагують на них, що дає всій системі можливість зберігати нормовані властивості. Крім того встановлено, що при розвитку тріщин та ВПР змінюються параметри структури матеріалу, що впливає на його стійкість при дії морозу, особливо при однобічному заморожуванні. Це визначило задачу досліджень – проаналізувати вплив умов заморожування на зміну структурних параметрів цементного каменя.

Як правило, руйнування зразків при заморожуванні і відтаванні відбувається через зміну характеристик технологічних та експлуатаційних тріщин.

Для отримання кількісної оцінки структурних змін використовувався метод кількісної оцінки коефіцієнтів пошкодженості. Було досліджено три серії зразків з цементного каменю розміром $4 \times 4 \times 16$ см. Методика досліджень приведена в розділі 2, пп.2.3.4 [99]. Результати фіксувались після кожних 5 циклів заморожування-відтавання.

Фотофіксація зразків після певної кількості циклів заморожування та відтавання дозволила дослідити зміну пошкодженості зразків. Для об'єднання та накладання фотографій задля їх аналізу використовувалась програма AutoCAD.

Отримані результати дали змогу відтворити картину розвитку пошкодженості при об'ємному (рис. 4.1) і локальному впливі (рис. 4.2) від'ємних температур та кількісно встановити зміну K_n при багаторазовому заморожуванні та відтаванні.

Після п'яти циклів заморожування-відтавання кількісне значення показника коефіцієнта пошкодженості для O2- було більше на 31,5% в порівнянні з O1. В O2+ коефіцієнт пошкодженості збільшився на 28% відносно O1. Ця залежність в розвитку пошкодженості зберігається до 15 циклів заморожування-відтавання.

Проаналізувавши загальну довжину несучільностей відносно площі, на якій вони проявилися, були отримані результати, які свідчать, що як при об'ємному так і при локальному заморожуванні перші 5 циклів заморожування та відтавання є найбільш активними стосовно росту несучільностей. Найменший ріст був зафіксований після 10 циклів заморожування-відтавання (рис. 4.1-4.2).

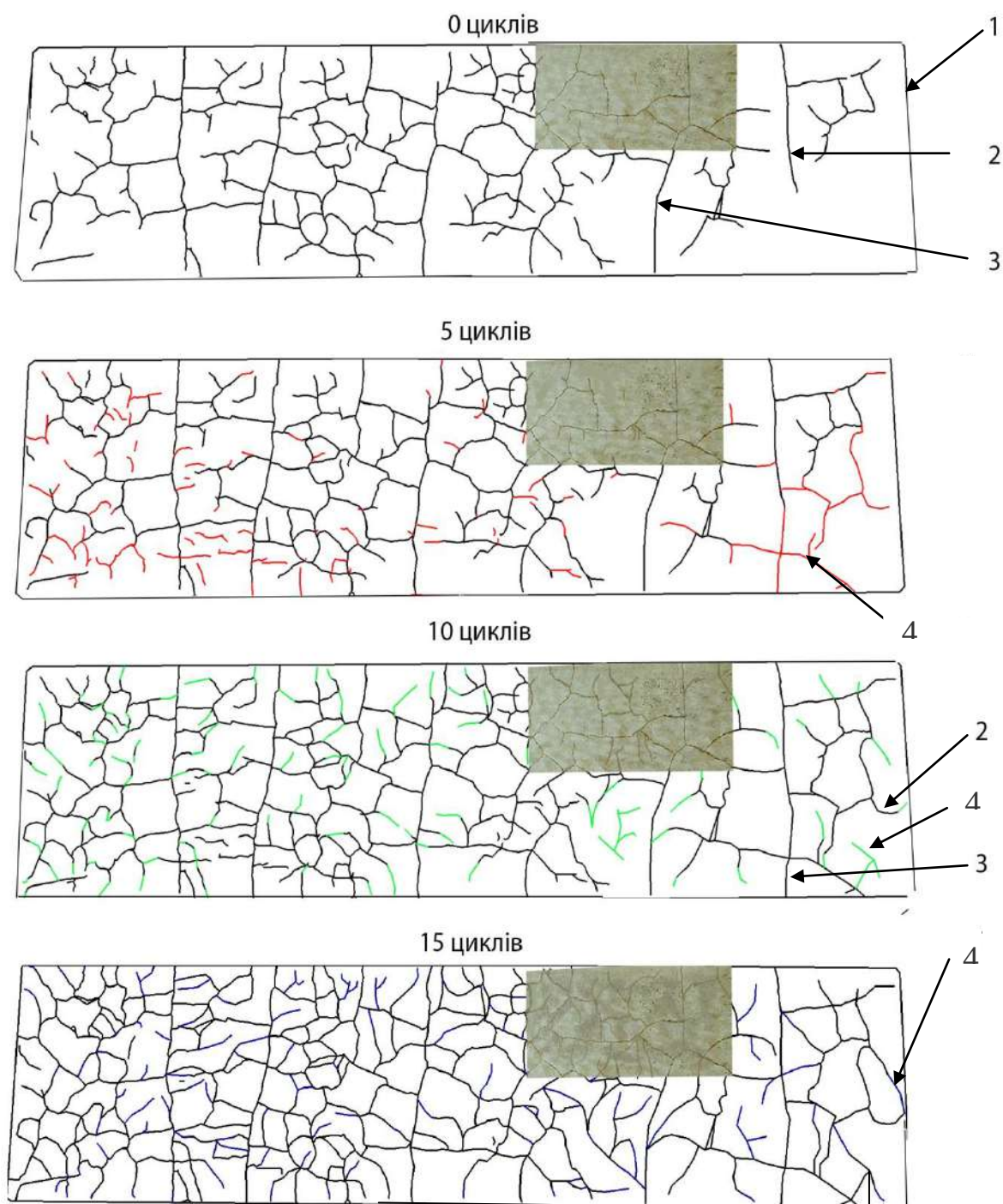


Рис.4.1. Вплив кількості циклів заморожування та відтавання на зміну K_n при всебічному впливі

1 – зразок; 2 – тріщини; 3 – поверхні розділу; 4 – новоутворені несучільності

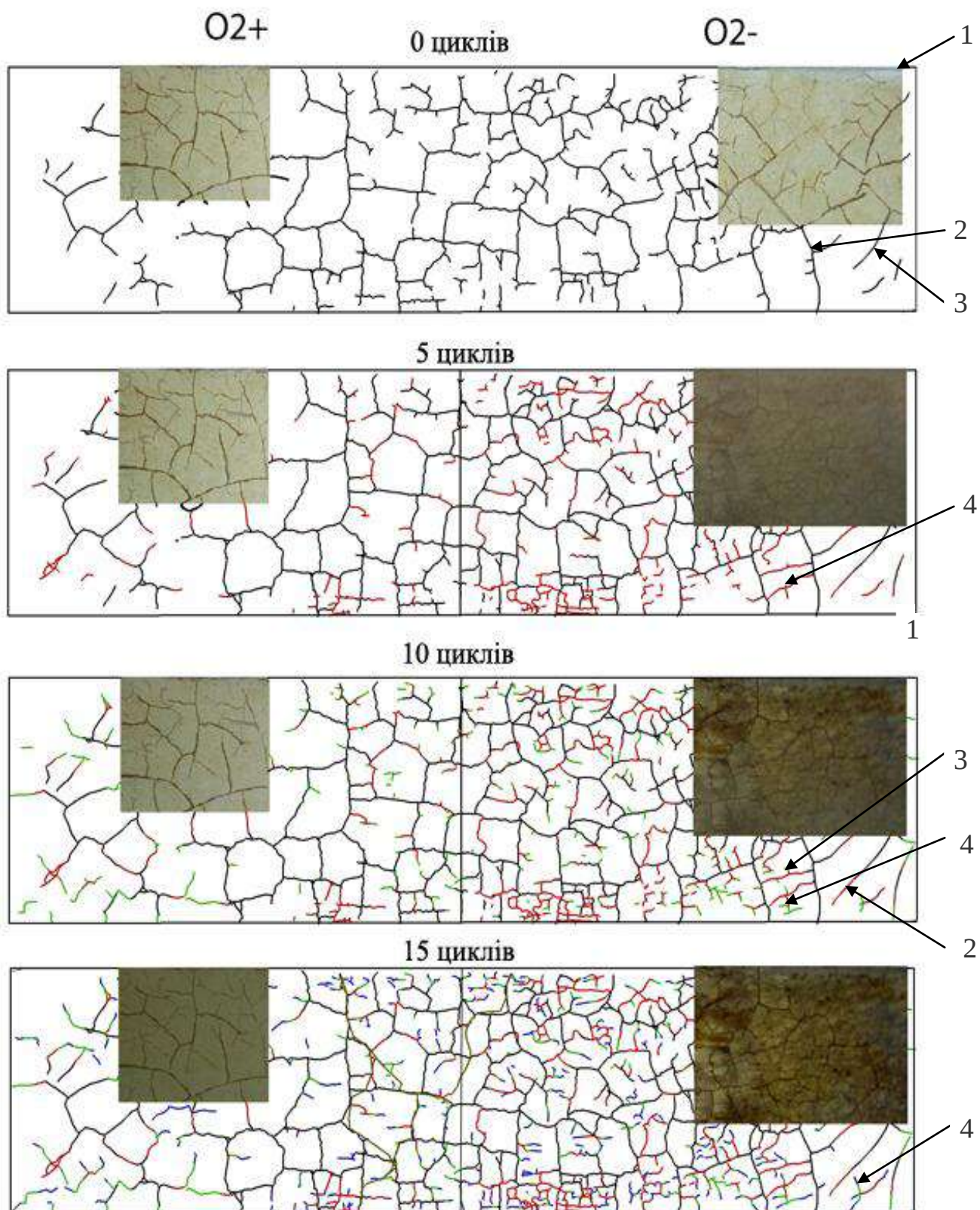


Рис.4.2. Вплив кількості циклів заморожування та відтавання на зміну K_n при однобічному впливі

1 – зразок; 2 – тріщини; 3 – поверхні розділу; 4 – новоутворені несучільності

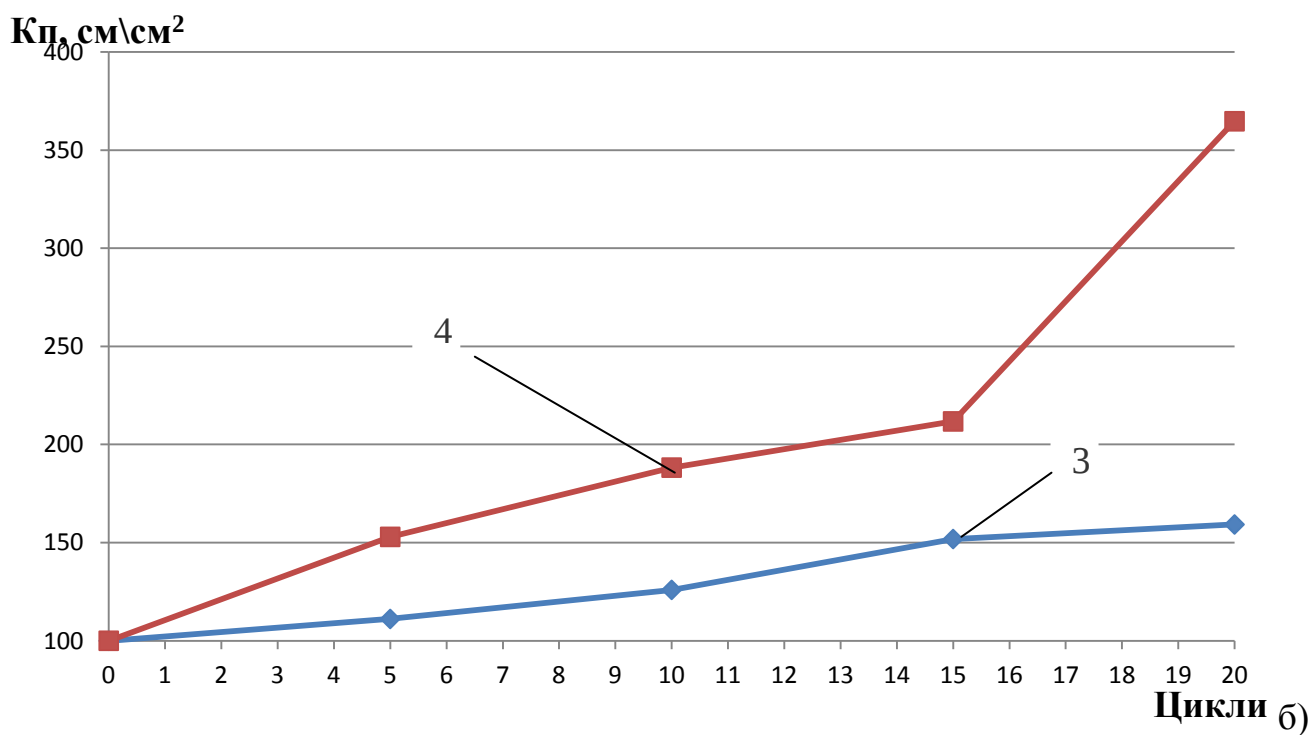
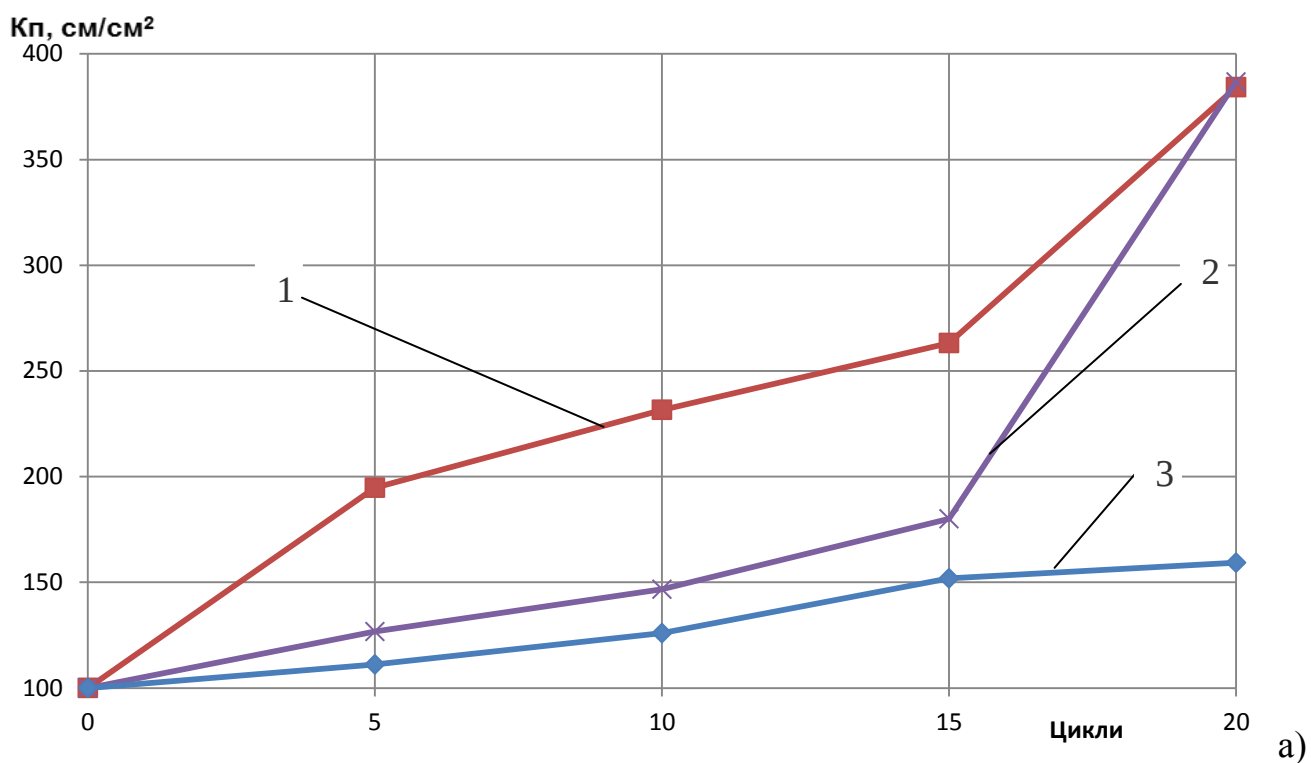


Рис.4.3. Вплив кількості циклів заморожування та відтавання на зміну K_p при: а) локальному впливі; б) об'ємному впливі;

1 – частина зразка, що піддавалась заморожуванню та відтаванню; 2 – частина зразка, що не піддавалась заморожуванню та відтаванню; 3 – контрольні зразки; 4 – зразки, що заморожувались всебічно

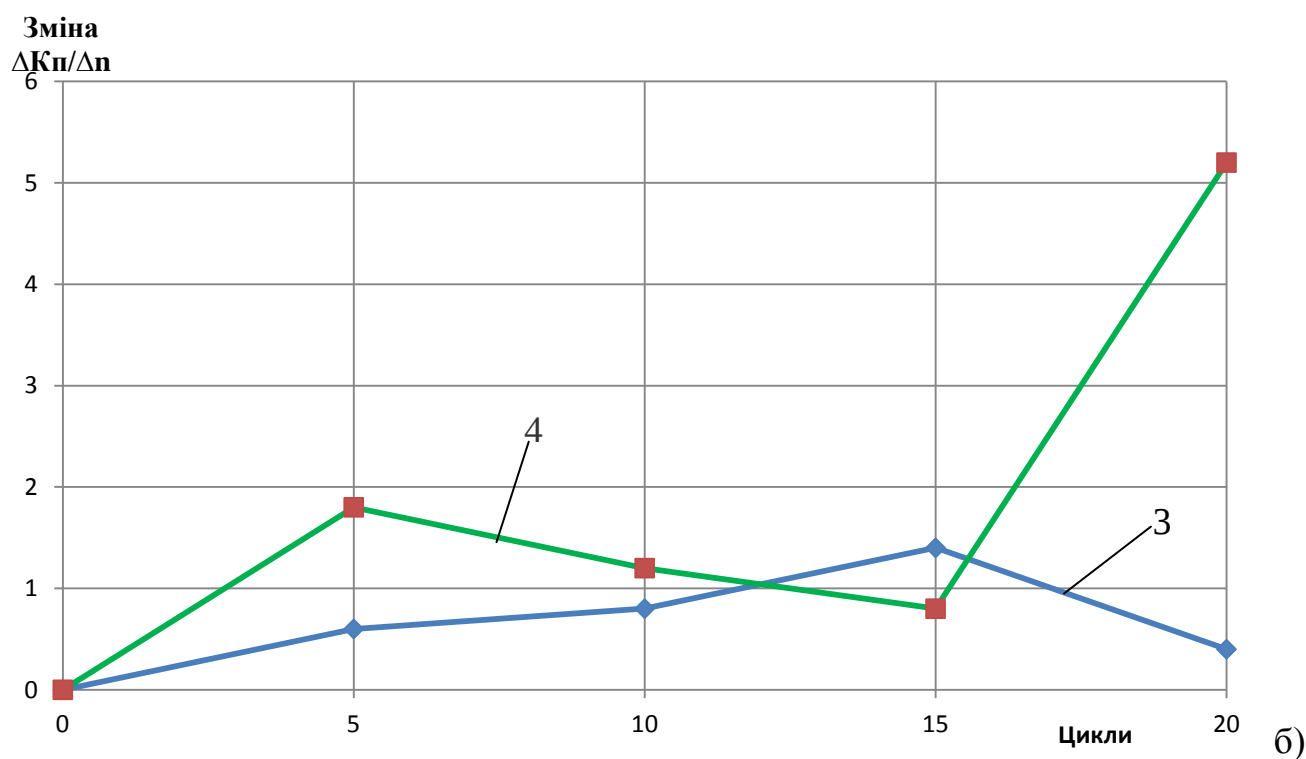
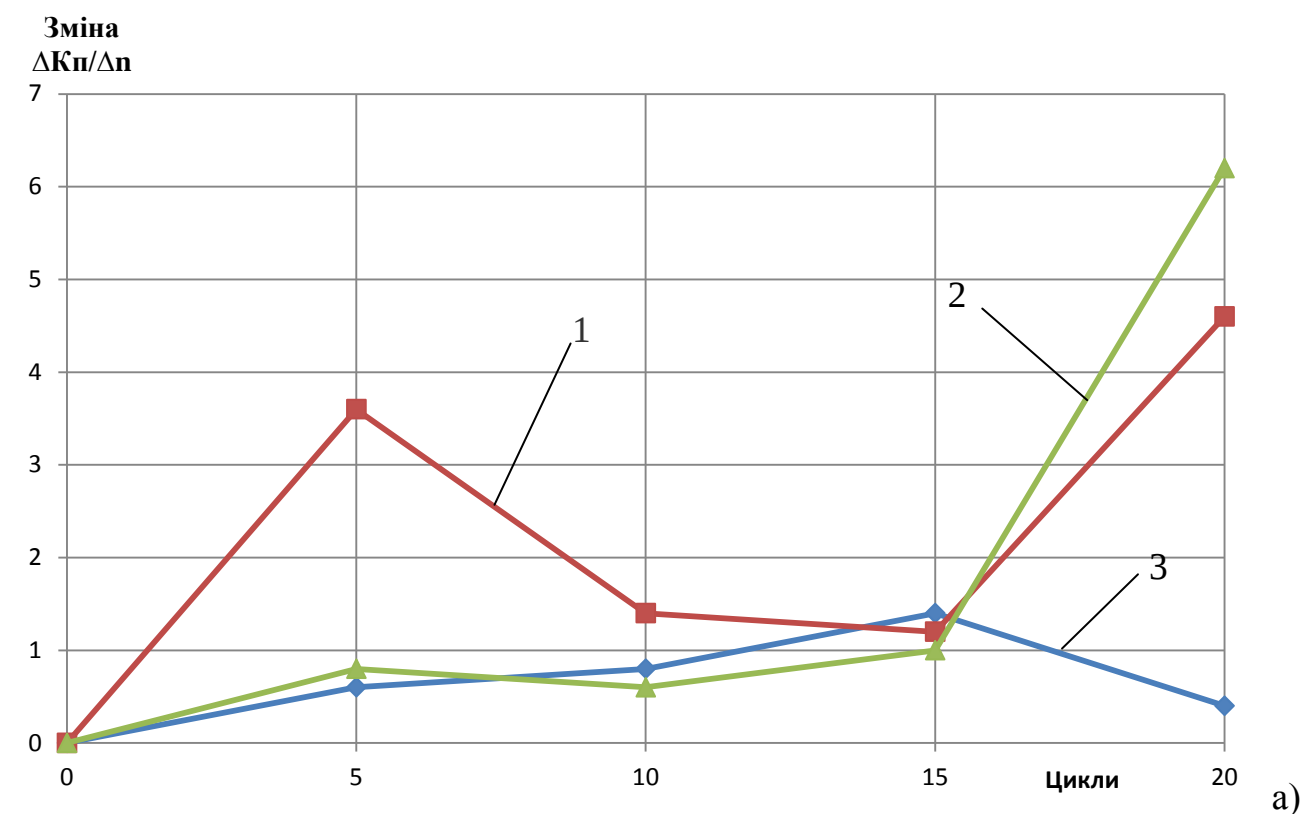


Рис.4.4. Кінетика зміни $K_{п}$ при: а) локальному впливі; б) об'ємному впливі;
 1 – частина зразка, що піддавалась заморожуванню та відтаванню; 2 – частина зразка, що не піддавалась заморожуванню та відтаванню; 3 – контрольні зразки; 4 – зразки, що заморожувались всебічно

Таблиця 4.1

Вплив кількості циклів заморожування та відтавання на зміну K_n

Кількість циклів	K_n при всебічному впливі, см/см^2	K_n при локальному впливі O_2^+ , см/см^2	K_n при локальному впливі O_2^- , см/см^2	K_n контрольних зразків, см/см^2
0	100	100	100	100
5	111	127	195	153
10	126	147	232	188
15	152	180	263	212
20	159	387	384	365

Зміна пошкодженості після 5 циклів заморожування та відтавання є найбільш інтенсивною зі всього процесу зміни структури, що дає змогу припустити, що вже після 5 циклів заморожування та відтавання починаються активні незворотні зміни структури цементного каменю.

Отримані результати дали змогу оцінити вплив кількості циклів заморожування та відтавання на зміну K_n при локальному та об'ємному впливах.

Результати показали, що після 20 циклів всебічного та локального заморожування та відтавання коефіцієнт пошкодженості зразків збільшився в 2,5 рази (рис. 4.3).

Для детального аналізу зміни структури, виходячи з отриманих даних, був побудований графік кінетики зміни K_n при локальному та об'ємному впливах (рис. 4.4).

Отримані дані показали, що найбільш інтенсивний ріст несучільностей, як для всебічного, так і для однобічного впливу, відбувся на 20 цикл заморожування та відтавання. В цей період зразок почав руйнуватися. Наступний за активністю період росту несучільностей відповідає 5 циклам заморожування та відтавання.

Проведений аналіз зміни K_n дав змогу оцінити якісно та кількісно структурні зміни, що відбувались в зразках при їх заморожуванні та відтаванні. Можна зробити висновок, що після п'яти циклів заморожування та відтавання в зразку відбуваються структурні зміни, які розвиваються зі збільшенням кількості циклів (рис. 4.1). Аналіз результатів дослідження показав, що коефіцієнт пошкодженості в зразках після 20 циклів заморожування-відтавання при локальному впливі має однаковий показник як для O2+, так і для O2-.

Вже після 5 циклів заморожування-відтавання в зразках починається зміна K_n , динаміка якої не залежить від виду впливу на зразок. Пошкодженість зон O2- при локальному впливі збільшувалась більш інтенсивно (табл. 4.1).

Кінетика зміни пошкодженості в зоні O2- веде до збільшення K_n більш інтенсивно в порівнянні з зоною O2+.

Аналіз отриманих результатів дослідження дав можливість зробити висновок, що K_n зразків, які були під впливом локального заморожування та відтавання, на 6% менше, ніж зразків, що були під впливом об'ємного заморожування-відтавання.

Отримані результати експериментально підтверджують висунуте припущення, що морозостійкість матеріалу залежить від умов заморожування зразків. Однобічне (локальне) заморожування, як показано в розділі 3, п.3.1, змінює характер формування фронту промерзання, що веде до змін внутрішнього масопереносу. Такі зміни сприяють зменшенню негативних впливів, що веде до стабілізації структури цементного каменю, про що опосередковано свідчать результати по зміні K_n в залежності від умов заморожування. Стабілізація параметрів структури має привести до підвищення опору матеріалу негативним впливам від'ємних температур.

4.2. Вплив умов заморожування на зміну фізичних характеристик цементного каменю

4.2.1. Вплив умов заморожування на зміну маси та водопоглинання

Швидкість структурних змін, пов'язаних з багаторазовим заморожуванням та відтаванням, як показали проведені дослідження, залежить від умов заморожування зразків. Збільшення кількісних значень пошкодженості зразків свідчить про ріст кількості несучільностей в матеріалі, що має впливати на його фізичні властивості: водопоглинання та масу. В свою чергу, збільшення кількості вільної води за рахунок збільшення об'єму несучільностей інтенсифікує процеси руйнування. В зв'язку з тим, що темпи зміни структури залежать від умов заморожування, була поставлена задача: встановити залежність між зміною кількісних показників фізичних характеристик (водопоглинання та маси) цементного каменя та умовами заморожування зразків.

Згідно з вимогами нормативних документів (ДСТУ Б В.2.7-47-96), при оцінці морозостійкості особливу увагу приділяють зміні маси зразків. Це пов'язано з тим, що зменшення маси відбувається при частковому руйнуванні зразків.

Оскільки водопоглинання і коефіцієнт пошкодженості є кількісним та якісним відображенням структурних змін, які відбуваються в зразку при впливі заморожування та відтавання, то доцільно проаналізувати їх зміну в умовах різного типу заморожування та відтавання.

Методика проведення досліджень зміни маси та водопоглинання матеріалу приведена в розділі 2. Маса зразків, що піддавалися заморожуванню та відтаванню всебічно (O1), після 20 циклів збільшилась на 4% в порівнянні з масою зразків у віці 28 діб. Зразки, які піддавалися заморожуванню та відтаванню локально (O2), після 20 циклів практично не змінили свою масу (рис. 4.5.а).

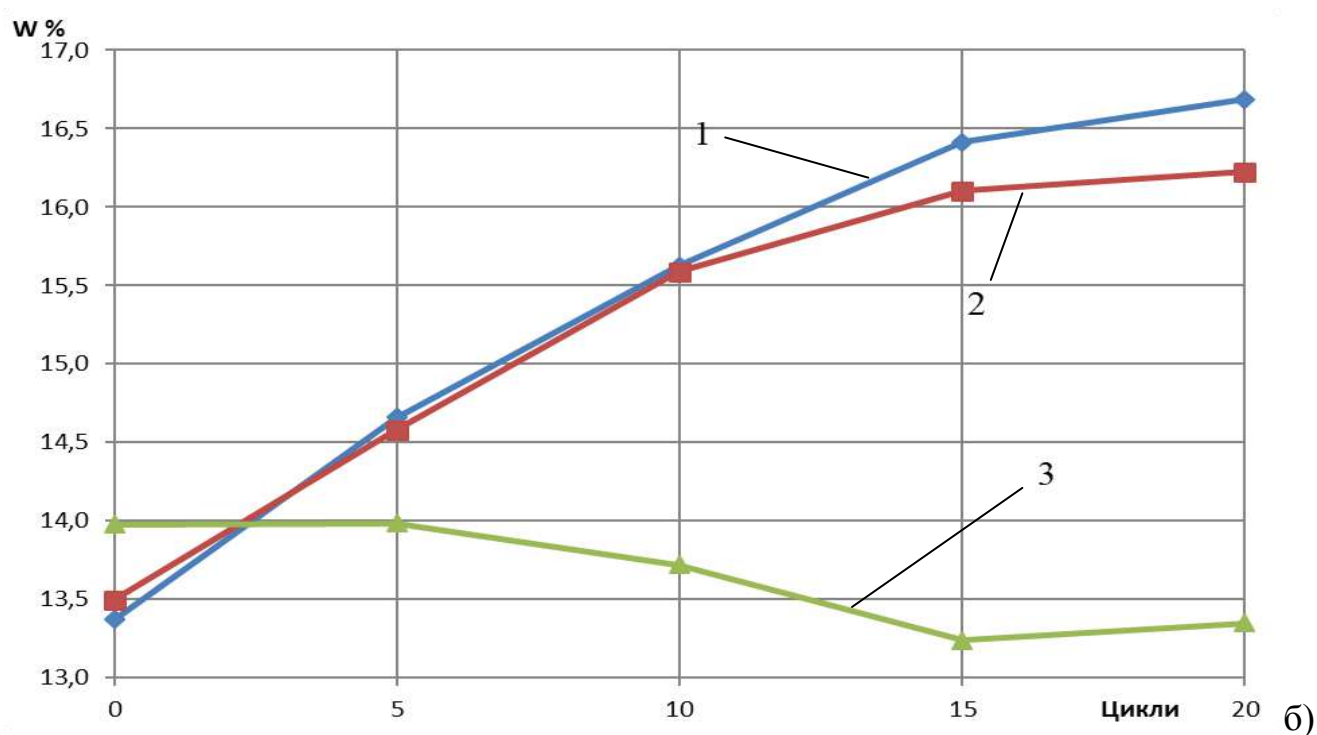
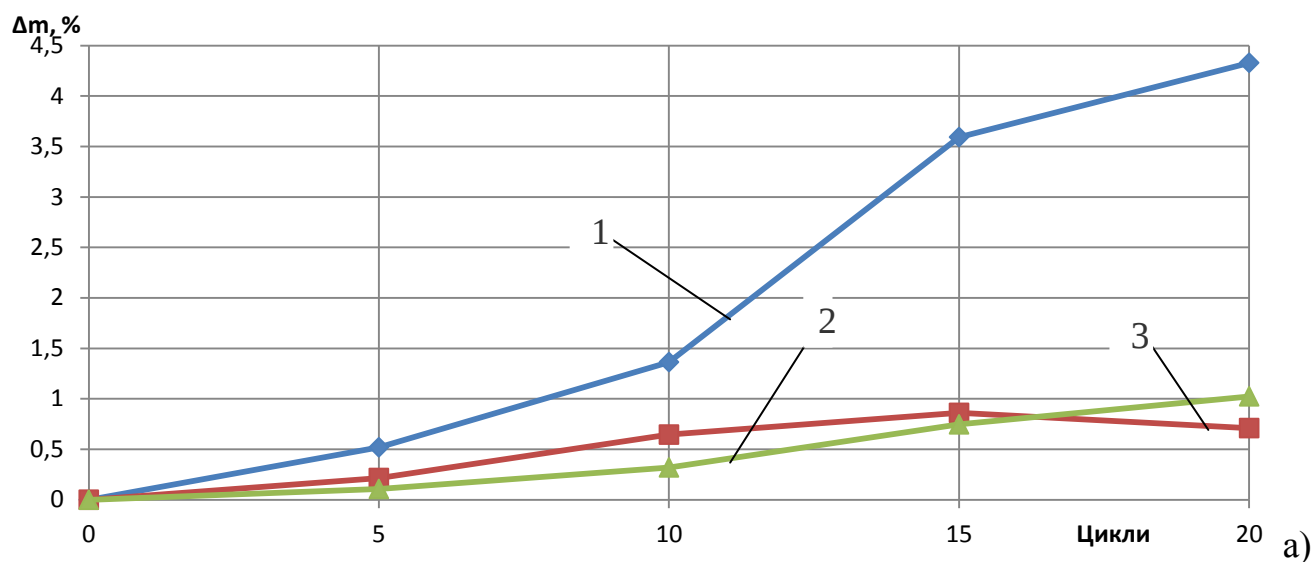


Рис. 4.5. Вплив умов заморожування зразків з цементного каменю в залежності від кількості циклів на зміну:

а) маси (m , %);

б) водопоглинання (W , %);

1 – при всебічному впливі; 2 – при однобічному впливі; 3 – контрольні зразки

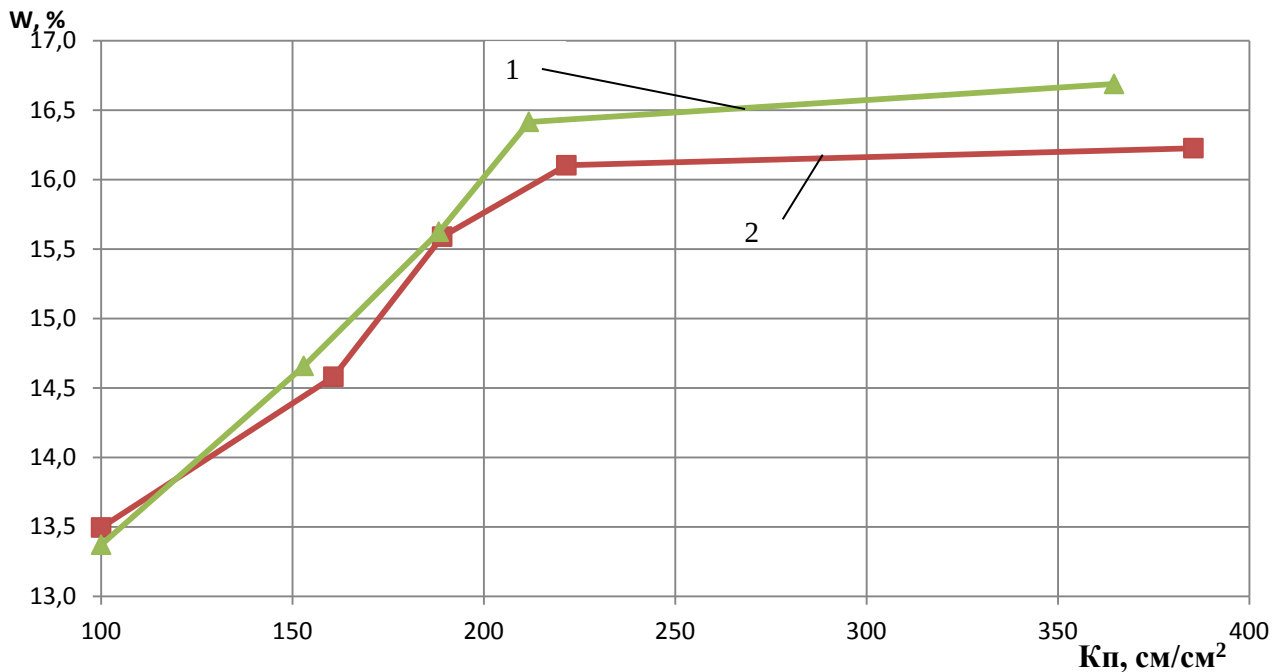


Рис. 4.6. Порівняльний аналіз зміни коефіцієнтів пошкодженості на зміну водопоглинання зразків в умовах заморожування та відтавання
1 – при всебічному впливі; 2 – при однобічному впливі

При всебічному впливі заморожування-відтавання (O1) водопоглинання зразків після 20 циклів збільшилось на 24,6%, при однобічному впливі (O2) – на 21% (табл. 4.2). Водопоглинання контрольних зразків після 20 циклів зменшилось на 4%.

Збільшення кількості несучільностей при збільшенні кількості циклів заморожування та відтавання веде до збільшення водопоглинання. Проведений аналіз показав, що водопоглинання нелінійно зростає при збільшенні значень коефіцієнтів пошкодженості. На рис. 4.6 показаний вплив зміни коефіцієнта пошкодженості на зміну водопоглинання для зразків з цементного каменя.

Отримані результати свідчать, що структурні зміни, які виникають в цементному камені в умовах багаторазового заморожування та відтавання, ведуть до незворотної зміни фізичних властивостей матеріалу. При цьому важливо, що в залежності від типу заморожування змінюється швидкість структурних змін, що необхідно враховувати при прогнозуванні працездатності будівельних виробів та конструкцій з композиційних матеріалів в залежності від умов експлуатації.

Як показав аналіз результатів проведених досліджень, збільшення водопоглинання зразків з цементного каменю після циклічного заморожування свідчить про структурні зміни, які відбуваються в зразку.

Таблиця 4.2

Порівняльний аналіз зміни коефіцієнтів пошкодженості на зміну водопоглинання та маси зразків в умовах заморожування та відтавання

Кількість циклів	Всебічний вплив			Локальний вплив		
	$\Delta W, \%$	$\Delta m, \%$	$K_{п}, \text{см/см}^2$	$\Delta W, \%$	$\Delta m, \%$	$K_{п}, \text{см/см}^2$
0	13,4	0	100	13,5	0	100
5	14,7	0,52	111	14,6	0,22	127
10	15,6	1,36	126	15,6	0,65	147
15	16,4	3,59	152	16,1	0,86	180
20	16,7	4,33	159	16,2	0,71	387

Різниця показників водопоглинання зразків при об'ємному та локальному впливах склала 4%.

В результаті аналізу спостерігається паралельна зміна водопоглинання та коефіцієнта пошкодженості незалежно від виду впливу заморожування та відтавання.

Виконане дослідження дало можливість оцінити вплив всебічного і однобічного заморожування зразків на зміну маси та водопоглинання будівельних матеріалів.

4.2.2. Вплив умов заморожування на зміну швидкості проходження ультразвуку в зразках

Використання неруйнівних методів визначення фізичних характеристик матеріалу, методика яких приведена в розділі 2, дає можливість кількісно оцінити

зміну структури матеріалу конструкцій та виробів при різних типах впливу заморожування та відтавання. Переваги оцінки структури матеріалу неруйнівним методом полягає в тому, що для аналізу можна використовувати один й той самий зразок на будь-якому етапі проходження циклів заморожування-відтавання, що дає змогу більш точно аналізувати процеси, які в ньому протікають. Також використання неруйнівного методу контролю дозволяє кількісно та якісно проаналізувати процеси зміни структури матеріалу тільки в половиних зразків, що важливо при аналізі впливу однобічного заморожування.

Відомо, що швидкість проходження ультразвуку крізь матеріал залежить від його структури. Особливо впливає на розповсюдження звукової енергії наявність в матеріалі поверхонь розділу. До поверхонь розділу фахівці відносять зони контакту матричного матеріалу з заповнювачами, поверхні, що розділяють структурні агрегати, берега несучильностей у вигляді тріщин, пор, капілярів та внутрішніх поверхонь розділу. Вплив умов заморожування на зміну пошкодженості дає підстави вважати, що утворення нових несучильностей буде впливати на зміну швидкості розповсюдження звукових хвиль в зразках. В свою чергу, зміна швидкості проходження ультразвуку слугує опосередкованим доказом незворотних змін структури матеріалу після періодичного заморожування та відтавання.

Це обумовило задачу досліджень: виявити вплив зміни умов заморожування зразків на зміну швидкості проходження ультразвуку в цементному камені.

Проаналізувавши отримані результати, можна оцінити зміну швидкості проходження ультразвуку в зразку в двох напрямках:

- вздовж (L) – база 160 мм.
- поперечно (a) – база 40 мм.

Це дало змогу дослідити зміну швидкості проходження ультразвуку в зразках в залежності від умов заморожування та відтавання.

Результати показали, що швидкість проходження ультразвуку в зразках О1 з цементного каменю (база L) після 20 циклів заморожування-відтавання знизилась на 37%, а в базі a – на 22% (рис. 4.7.а).

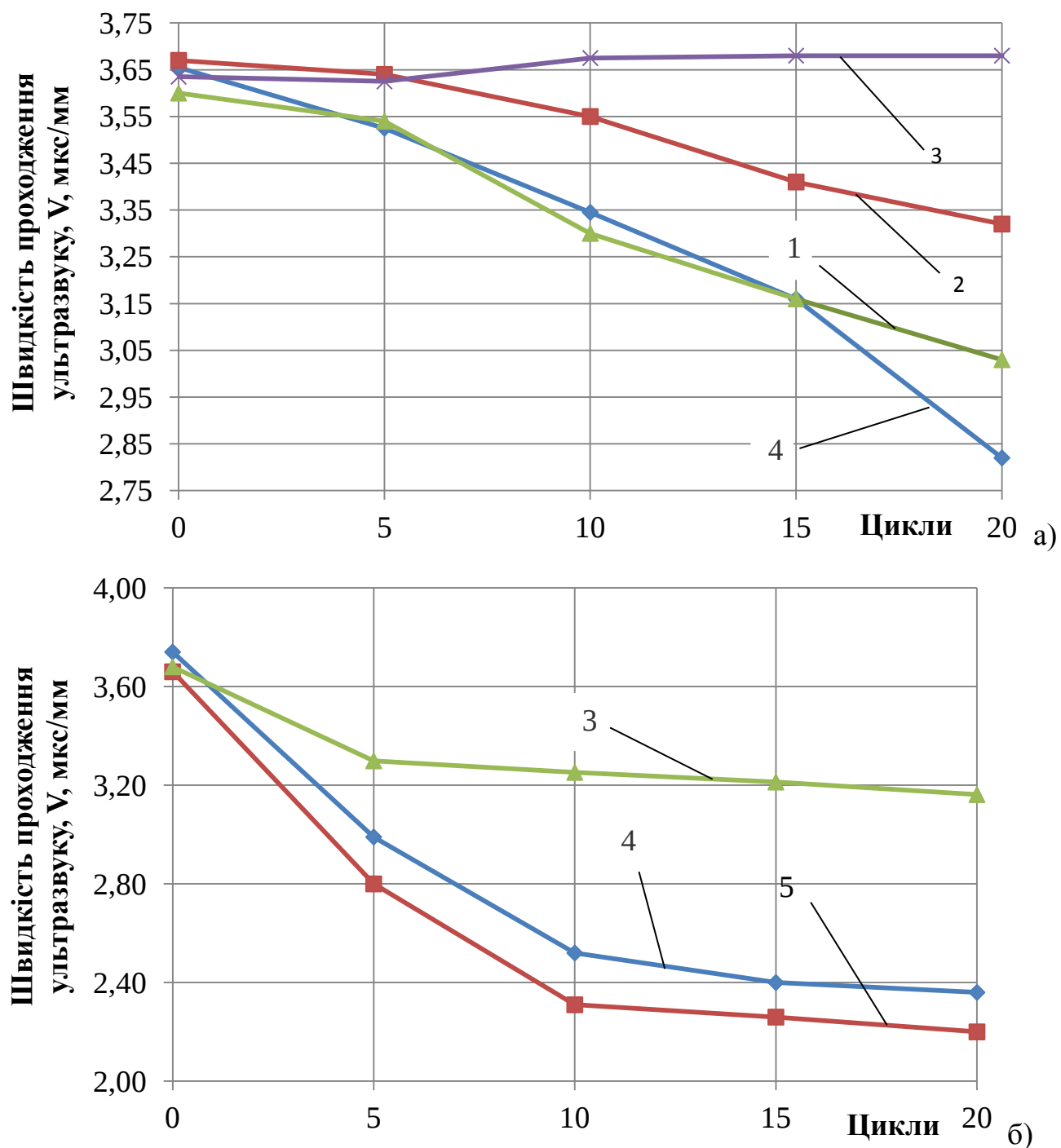


Рис. 4.7. Вплив умов заморожування на зміну швидкості проходження ультразвуку в зразках:

а) поперечно (a);

б) вздовж (L);

1 – частина зразка, що заморожувалась; 2 – частина зразка, що не заморожувалась; 3 – контрольні зразки; 4 – зразки, що заморожувались всебічно; 5 – зразки, що заморожувались локально

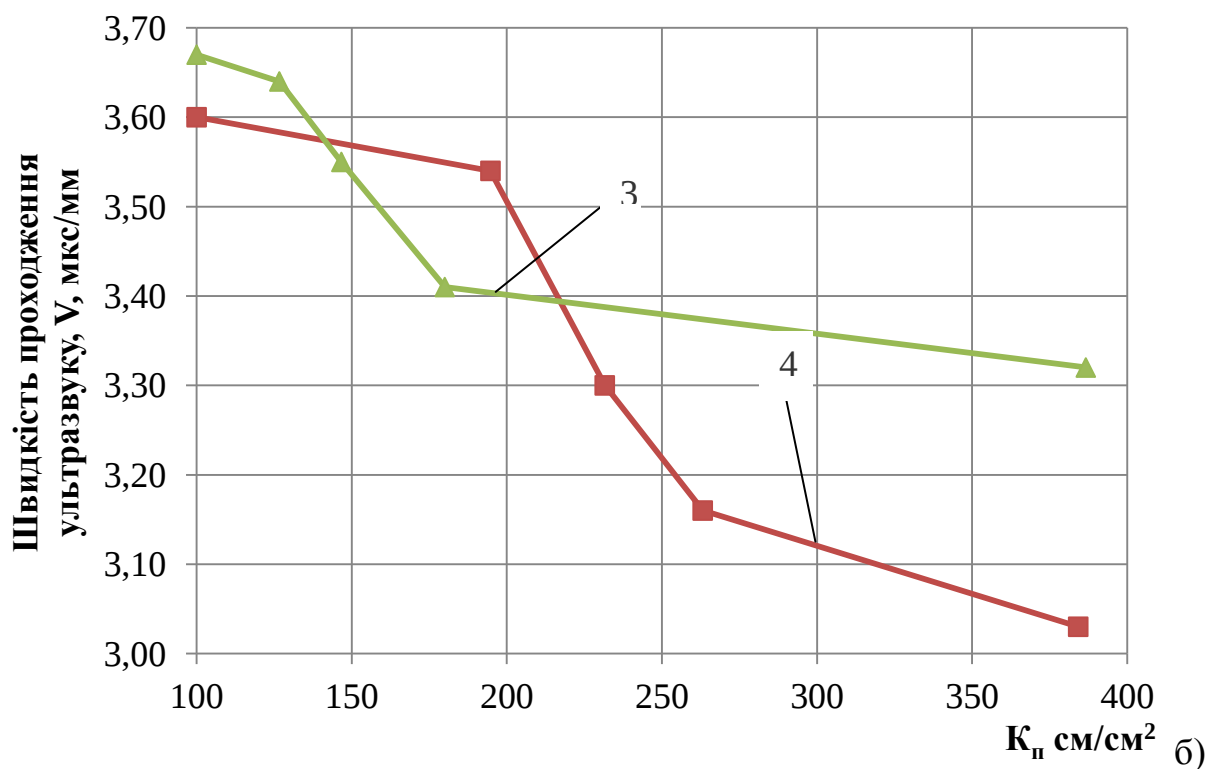
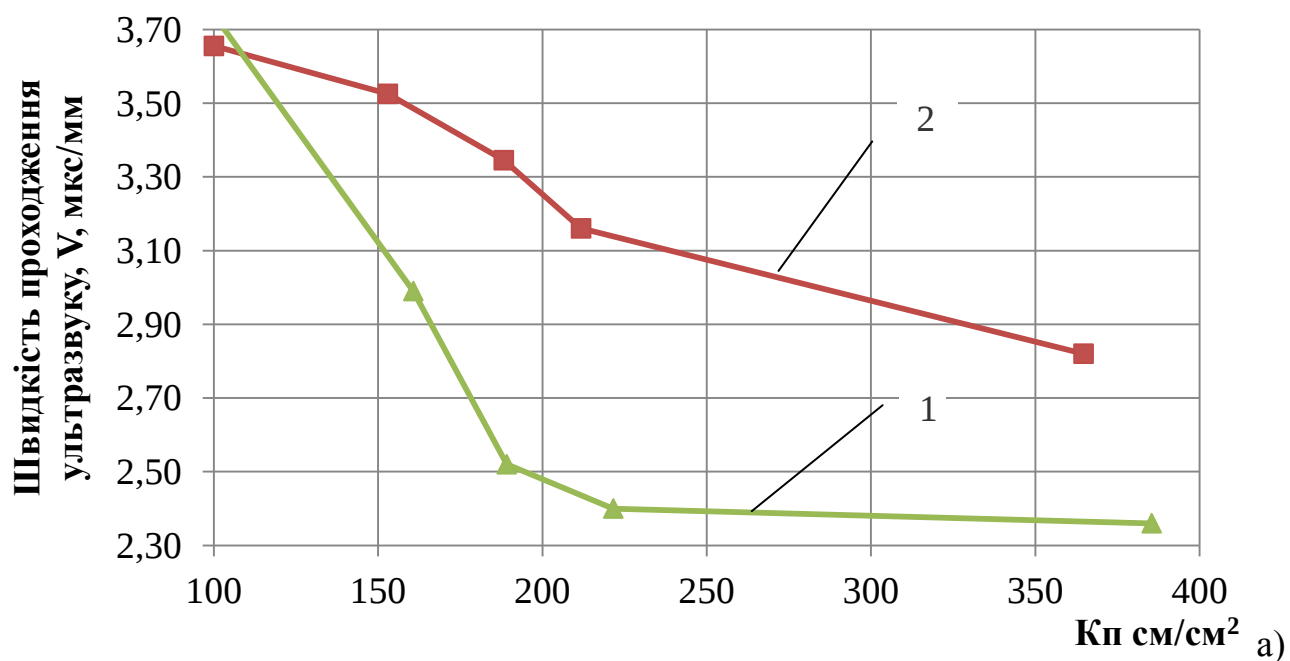


Рис. 4.8. Порівняльний аналіз зміни коефіцієнтів пошкодженості і зміни швидкості проходження ультразвуку в зразках при різних умовах заморожування та відтавання:

1 – зразки, що заморожувались локально; 2 – зразки, що заморожувались всебічно; 3 – половина зразка, що заморожувалась; 4 – половина зразка, що не заморожувалась

Таблиця 4.2

Порівняльний аналіз зміни коефіцієнтів пошкодженості і зміни швидкості проходження ультразвуку в зразках при різних умовах заморожування та відтавання

Кількість циклів	Всебічний вплив		Локальний вплив O2+		Локальний вплив O2-		Контрольні зразки	
	K _п , см/см ²	V, мкс/мм	K _п , см/см ²	V, мкс/мм	K _п , см/см ²	V, мкс/мм	K _п , см/см ²	V, мкс/мм
0	100	3,66	100	3,67	100	3,60	100	3,64
5	111	3,53	127	3,64	195	3,54	153	3,63
10	126	3,35	147	3,55	232	3,30	188	3,68
15	152	3,16	180	3,41	263	3,16	212	3,68
20	159	2,82	387	3,32	384	3,03	365	3,68

При однобічному впливі після 20 циклів заморожування та відтавання в зразках O2, база L, швидкість проходження ультразвуку знизилась на 42%, а в базі *a* в частині зразка O2+ та частині зразка O2- – на 9,5% та 16,3% відповідно (рис. 4.7.б).

Експериментальні дані показали, що зі збільшенням кількості циклів заморожування-відтавання в зразках з цементного каменю відбуваються структурні зміни, які різняться в залежності від виду впливу заморожування та відтавання (табл. 4.2).

Зі збільшенням кількості циклів заморожування та відтавання швидкість проходження ультразвуку зменшується. Зменшення показника V нелінійно, що свідчить про наявність кристалів солі всередині зразка та їх ріст.

На рис. 4.8.а відображений порівняльний аналіз зміни коефіцієнта пошкодженості та зміни швидкості проходження ультразвуку після впливу локального та всебічного заморожування. Зміна показників відбувається лінійно, при збільшенні пошкодженості швидкість проходження ультразвуку зменшується

пропорційно. В зразках, що піддавались всебічному заморожуванню та відтаванню, зниження V та збільшення K_n проходить більш інтенсивно, ніж при локальному заморожуванні.

Отримані результати поставили нову задачу: проаналізувати інтенсивність протікання процесу, який відбувається в одному зразку, половини якого знаходяться при різних температурних діапазонах (рис. 4.8.а.б).

Для зразків з всебічним впливом зміна коефіцієнту пошкодженості відносно зміни швидкості ультразвуку показали лінійний характер. Зменшення швидкості ультразвуку відповідає збільшенню коефіцієнту пошкодженості (рис. 4.8.а).

Отримані результати для зразків з однобічним впливом показали (рис. 4.8.б), що в зразку відбуваються структурні зміни, як в частині, що проходила циклічне заморожування, так і в частині, яка знаходилась в зоні плюсових температур. Але для зразків O2+ структурні зміни менш інтенсивні.

Зміна водопоглинання, яка фіксувалась раніше, при багаторазових змінах температури повітря свідчить про зміну порової структури, що опосередковано підтверджується зменшенням швидкості проходження ультразвуку в зразках при збільшенні кількості циклів заморожування-відтавання.

Проведений аналіз показав, що зміна бази при визначенні швидкості проходження ультразвуку відображається на результаті вимірювань. Також аналіз результатів дослідження свідчить про вплив умов заморожування на зміну швидкості проходження ультразвуку в зразку. При локальному впливі зміна швидкості проходження ультразвуку менш інтенсивна, ніж при об'ємному впливі.

4.3. Зміна міцності та стійкості цементного каменя при циклічному заморожуванні-відтаванні

Проведені раніше експериментальні дослідження дали змогу побачити зміну коефіцієнту пошкодженості при багаторазових циклах заморожування-відтавання, яка підтвердилась зміною водопоглинання. Ці зміни свідчать про

зміну порової структури матеріалу, що опосередковано підтверджується зменшенням швидкості ультразвуку при збільшенні кількості циклів заморожування-відтавання. Зміна структури матеріалу, в свою чергу, впливає на морозостійкість зразків. Тому була поставлена задача: дослідити зміну механічних характеристик цементного каменю при впливі різного типу заморожування та відтавання.

Міцність на розтяг при згині та міцність на стиск визначалась за методикою, викладеною в розділі 2.

Результати дослідження показали, що міцність на розтяг при згині (f_{ctf}) зразків, що піддавались всебічному заморожуванню та відтаванню (O1), зменшилась на 54%, тоді як показник f_{ctf} частини зразків, що піддавалась заморожуванню та відтаванню при локальному впливі, зменшився на 44%.

Міцність на стиск (f_{ctk}) зразків при всебічному впливі заморожування-відтавання зменшилась на 43%. При однобічному впливі показник f_{ctk} в частині зразка, яка не заморожувалась, зменшився на 27%, а в частині зразка, яка заморожувалась, – на 40% (табл. 4.3) [98, 100, 102, 103, 104, 105, 108].

Коефіцієнт стійкості зразків з цементного каменю визначався відношенням показника міцності зразка у віці 28 діб та показника міцності зразка після 20 циклів заморожування-відтавання (табл.4.4).

Таблиця 4.3

Міцність зразків після 20 циклів заморожування-відтавання

Вид мех. характеристик Вид впливу	На розтяг при згині, f_{ctf} , мПа	На стиск, f_{ctk} , мПа
Всебічний вплив (O1)	1,3	41,3
Локальний вплив (O2+)	1,58	54,2
Локальний вплив (O2-)		46,2
Контрольні зразки	2,85	73,4

Таблиця 4.4

Коефіцієнт стійкості після 20 циклів заморожування-відтавання

Вид мех. характеристик Вид впливу	На розтяг при згині	На стиск
Всебічний вплив (O1)	0,44	0,56
Локальний вплив (O2+)	0,55	0,73
Локальний вплив (O2-)		0,62
Контрольні зразки	0,97	0,97

Результати експериментів дали можливість наочно побачити, що в зразках з цементного каменю при різних типах впливу від'ємних температур зміна стійкості відбувається не однаково.

Проведені дослідження свідчать про істотний вплив умов заморожування на зміну фізико-механічних властивостей цементного каменю. Можна припустити, що при однобічному заморожуванні створюються більш сприятливі умови в зразках, здатні релаксувати частину небезпечних деформацій, що виникають при замерзанні води в поровому об'ємі матеріалу.

Результати досліджень показали, що зі збільшенням кількості циклів заморожування-відтавання в зразках з цементного каменю відбуваються зміни структури матеріалу, які залежать від умов впливу заморожування. Про це свідчить зміна таких показників як: коефіцієнт пошкодженості, водопоглинання, швидкість проходження ультразвуку.

Можна зробити висновок, що умови впливу від'ємних температур на виробу і конструкції грають істотну роль в їх здатності чинити опір морозному руйнуванню. Для детальнішого розкриття цієї закономірності були розроблені програми подальших досліджень, використовуючи цементно-піщаний розчин, як

об'єкт аналізу структурних змін, які відбуваються при різних типах впливу заморожування та відтавання.

4.4. Вплив умов заморожування на зміну структури розчину

Проведені дослідження показали істотний вплив умов заморожування на зміну структури цементного каменю. Однак використання цементного каменю як окремого будівельного матеріалу є рідкістю. Більш поширене використання цементу в будівельній галузі як складової матеріалу.

Найчастіше цемент використовується в цементно-піщаному розчині та бетоні.

Наступною стадією експерименту було поетапне вивчення типу впливу заморожування та відтавання на цементовмісні матеріали. Для цього були обрані зразки з цементно-піщаного розчину. В силу того, що основою складу бетонів є розчин, то, на нашу думку, сам розчин також є самостійним матеріалом, і доцільно вивчити вплив умов заморожування на його морозостійкість.

Відомо, що кінцева структура матеріалу залежить від його вихідного складу. Введення піску в складову змінює механізми організації структури композита, що веде до зміни його характеристик. Тому доцільно дослідити зміну всіх характеристик повторно. Це в свою чергу ставить задачу: дослідити вплив умов заморожування зразків з цементно-піщаного розчину на зміну їх структури та фізичних і фізико-механічних показників.

Склад розчину та методика проведення дослідження наведена в розділі 2.

4.4.1. Вплив умов заморожування на коефіцієнт пошкодженості

Технологічні тріщини утворюють своєрідну розгалужену мережу, що передбачає їх взаємодію і взаємовплив при замерзанні в їх об'ємі вільної води. Така взаємодія і взаємовплив має визначати структурні зміни КБМ і, тим самим, їх здатність чинити опір морозному руйнуванню. У зв'язку з цим була поставлена

задача вивчення та аналізу зміни пошкодженості матеріалу в залежності від виду впливу заморожування та відтавання зразків з розчину.

Процеси, які відбуваються в об'ємі несуцільностей при замерзанні вільної води, перетворюють їх в нестабільний структурний елемент матеріалу. Нестабільність тріщини пов'язана зі збільшенням ширини її розкриття та зі зменшенням тиску всередині тріщини. Це створює нерівномірний розподіл деформацій і напружень в навколишньому матеріалі, що може призвести до зростання тріщини.

Дані кількісної оцінки коефіцієнта пошкодженості розчину показують, що введення дрібного заповнювача веде до зменшення початкової пошкодженості в 3 рази в порівнянні з початковою пошкодженістю цементного каменю. Різна початкова пошкодженість передбачає різну її реакцію на зміну умов багаторазового заморожування та відтавання. На рис. 4.9 показана зміна коефіцієнта пошкодженості зразків в процесі всебічного впливу циклічного заморожування. На рис. 4.10 показана зміна пошкодженості зразків в процесі циклічного заморожування з локальним типом впливу.

Аналіз показує, що зі зміною кількості циклів заморожування-відтавання змінюється й характер пошкодженості. Характерно, що при різній кількості циклів заморожування-відтавання виникають тріщини досить рівнорозподілені по боковим граням зразка.

В таблиці 4.5 наведені кількісні значення коефіцієнту пошкодженості для зразків при всебічному впливі від'ємних температур. Як видно з таблиці, при перших 5 циклах заморожування-відтавання K_n змінився в 6 разів, при подальшому збільшенні кількості циклів до 40 K_n збільшився ще в 5 разів.

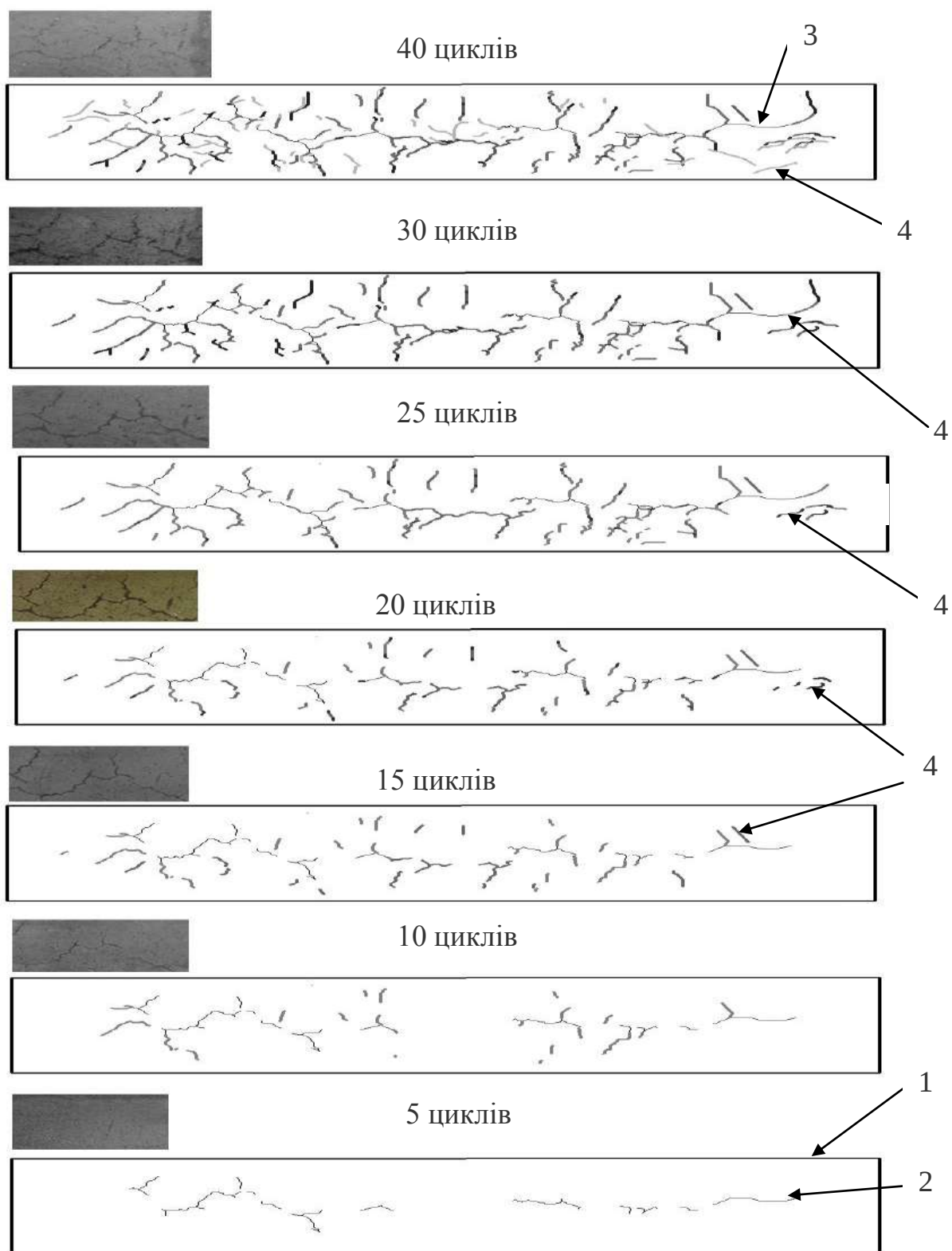


Рис. 4.9. Вплив кількості циклів всебічного заморожування-відтавання на зміну K_n

1 – зразок; 2 – тріщини; 3 – поверхні розділу; 4 – новоутворені несучільності

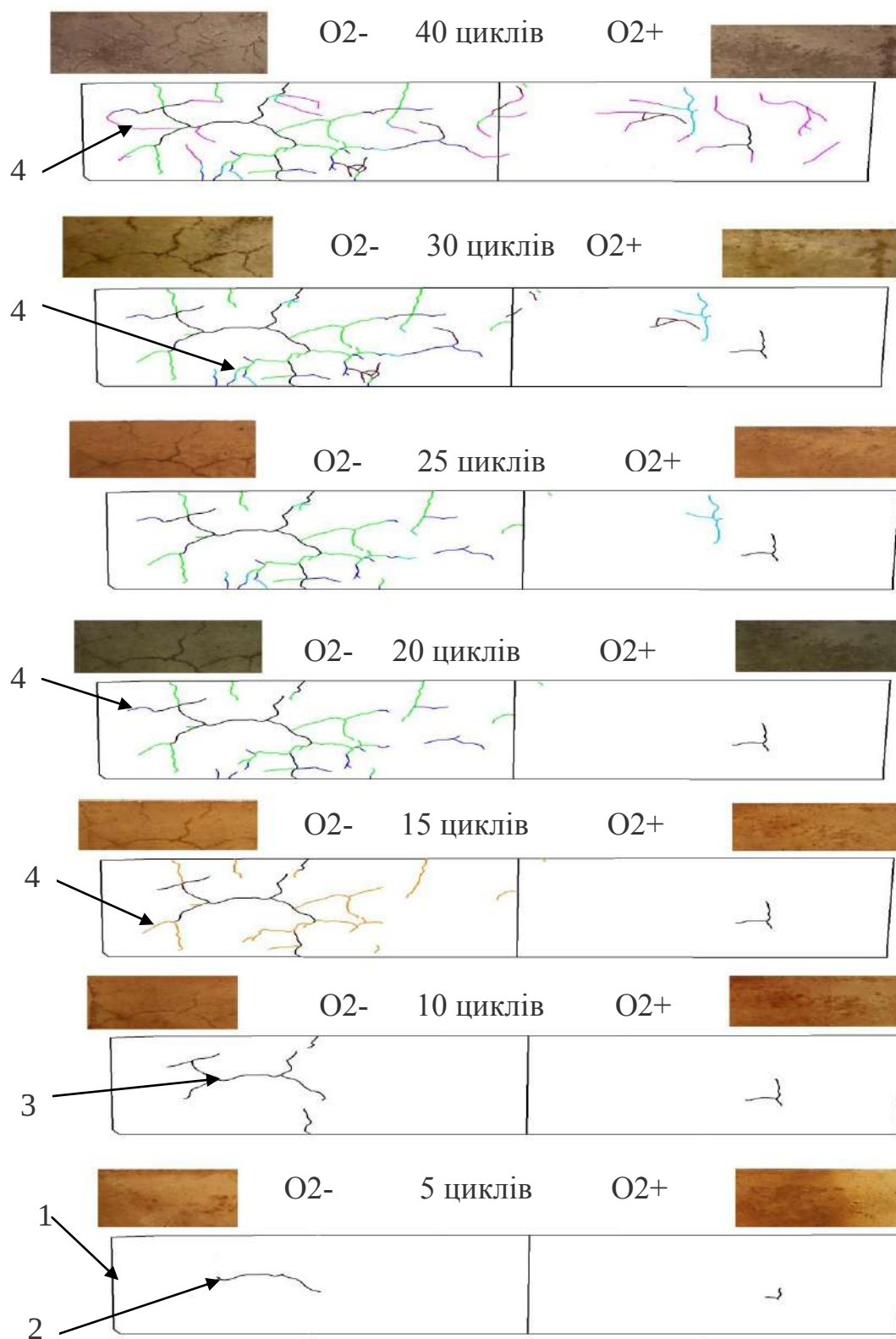


Рис. 4.10. Вплив кількості циклів однобічного заморожування та відтавання на зміну K_n

1 – зразок; 2 – тріщини; 3 – поверхні розділу; 4 – новоутворені несучільності

Таблиця 4.5

Зміна коефіцієнта пошкодженості в залежності від кількості циклів
заморожування-відтавання при всебічному впливі

К-ть циклів	0	5	10	15	20	25	30	40
K_n , см/см ²	0	0,06	0,08	0,09	0,13	0,16	0,23	0,31
ΔK_n , %	-	77	38	14	47	23	42	35

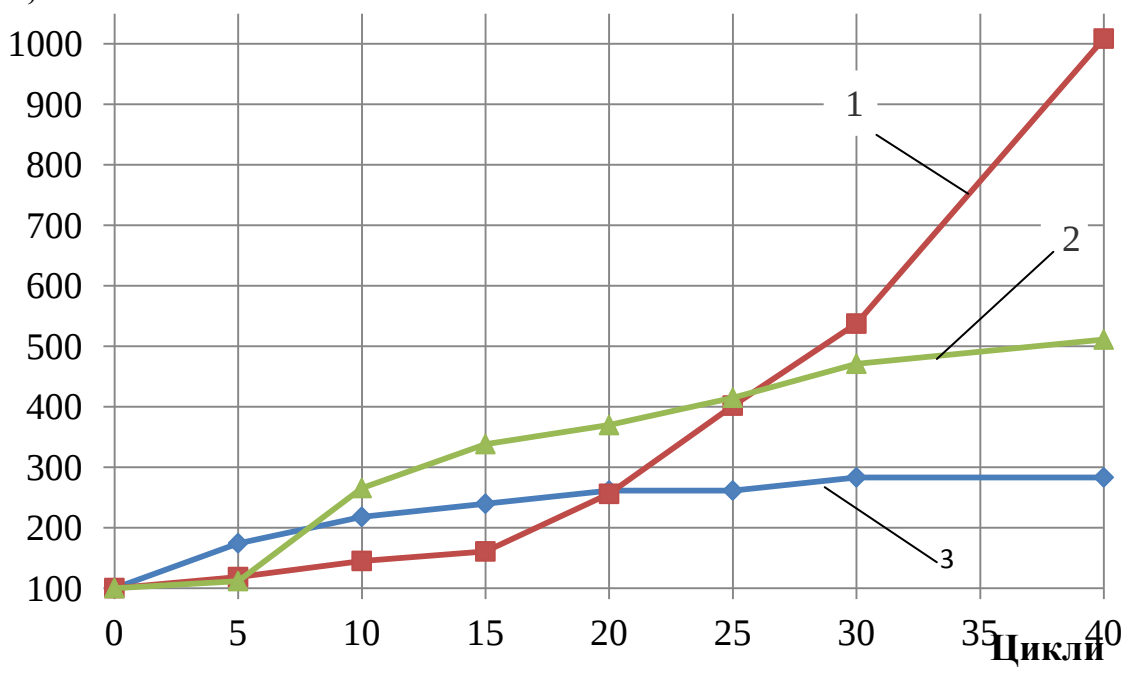
Звертає на себе увагу нелінійне збільшення K_n відносно кількості циклів заморожування-відтавання. Для аналізу кінетики зміни K_n були побудовані графіки оцінки впливу кількості циклів заморожування-відтавання на швидкість зміни K_n (рис. 4.11, рис. 4.12).

Проведений аналіз результатів показав кінетику зміни пошкодженості в зразках при різних типах впливів заморожування.

В зразках вже після 5 циклів заморожування-відтавання починається зміна K_n та розвиваються несуцільності індивідуально в залежності від виду впливу на зразок. Пошкодженість зразків при локальному впливі від'ємних температур збільшувалась менш інтенсивно, ніж при всебічному впливі.

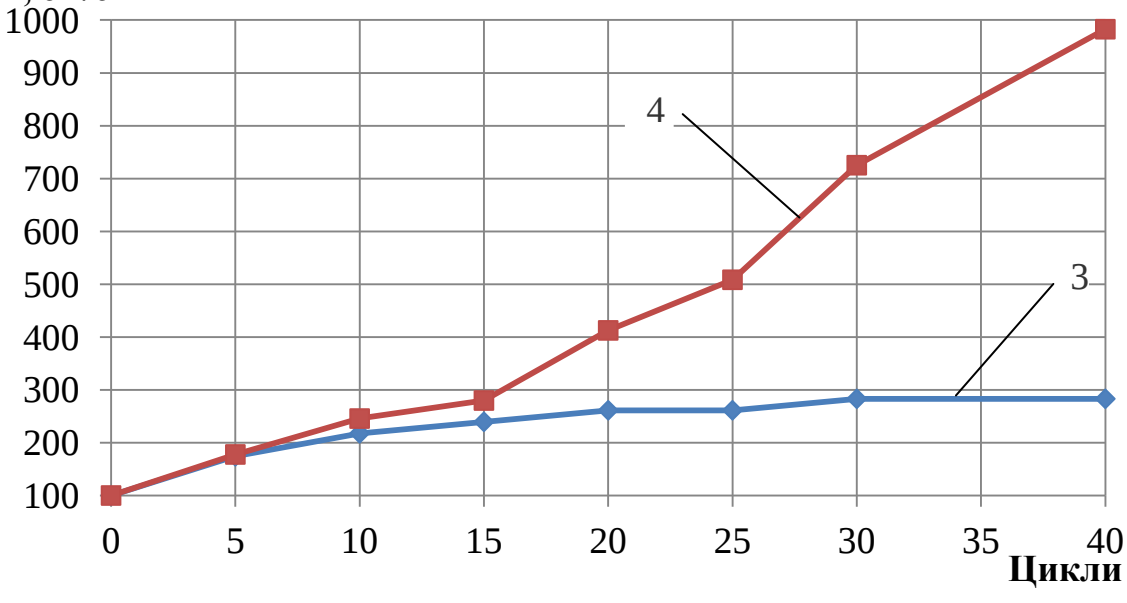
При локальному впливі зразок ділився на дві частини. Різні частини зразків знаходились в різних температурних діапазонах. Тому для детального аналізу доцільно проаналізувати зміну коефіцієнта пошкодженості для обох частин індивідуально (O2+ та O2-).

K_{Π} , см/см²



а)

K_{Π} , см/см²



б)

Рис. 4.11. Вплив кількості циклів заморожування-відтавання на зміну K_{Π} :

а) при односторонньому впливі;

б) при всебічному впливі;

1 – половина зразка, що заморожувалась; 2 – половина зразка, що не заморожувалась; 3 – контрольні зразки; 4 – зразки, що заморожувались всебічно

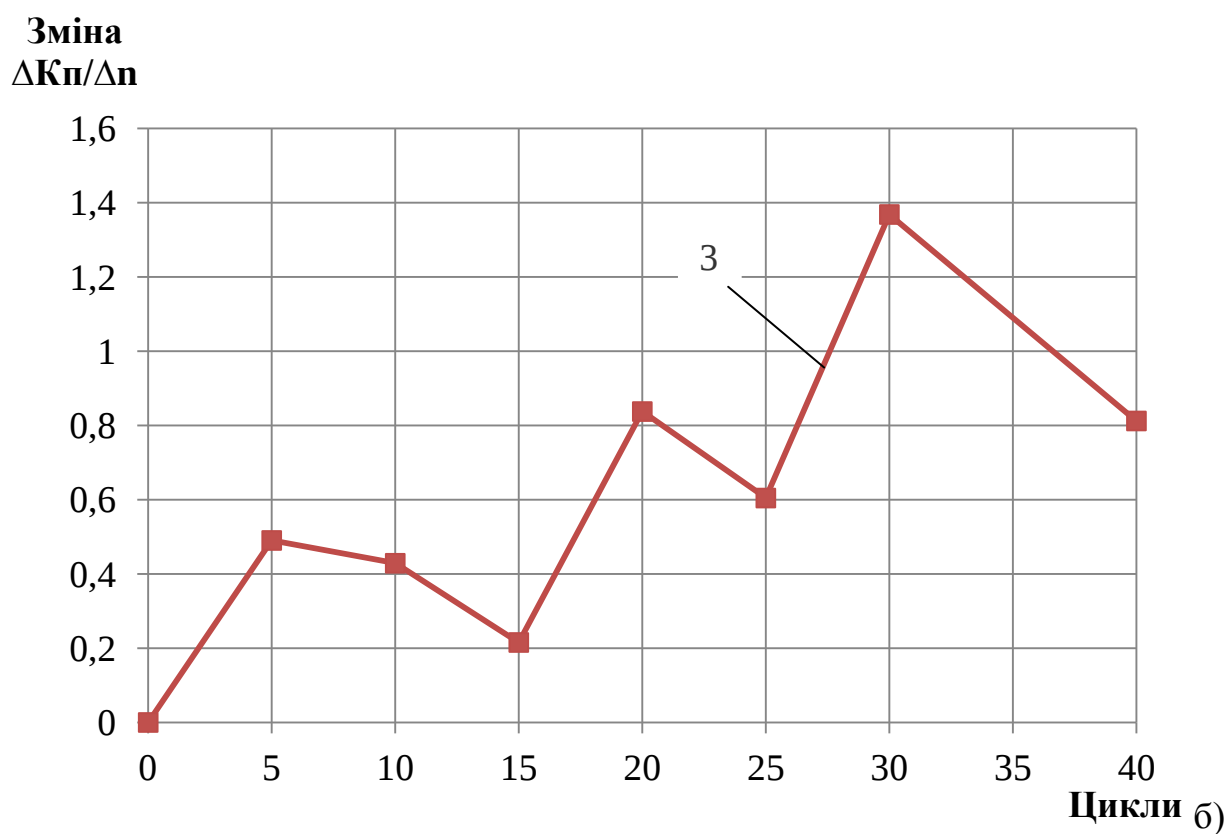
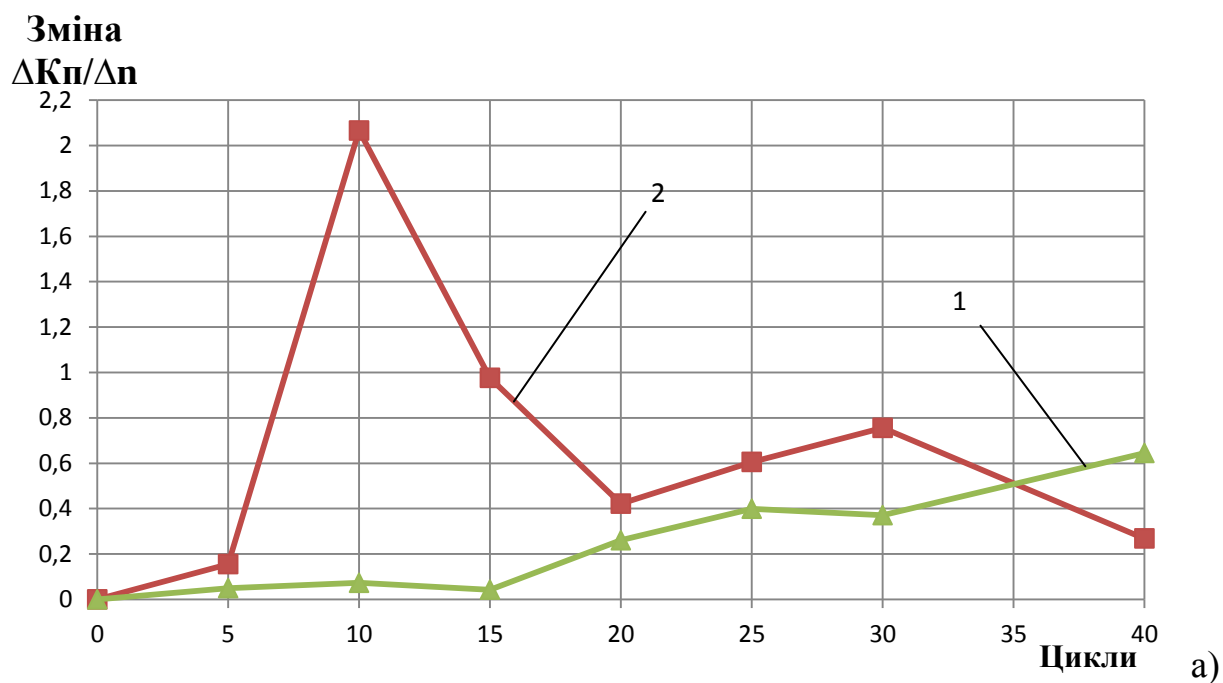


Рис. 4.12. Кінетика зміни K_p при:

а) однобічному впливі заморожування;

б) об'ємному впливі заморожування;

1 – половина зразка, що заморожувалась; 2 – половина зразка, що не заморожувалась; 3 – зразки, що заморожувались всебічно

Проведений аналіз частини зразка, яка не заморожувалась (O2+), при локальному впливі показав, що після 5 циклів заморожування та відтавання коефіцієнт пошкодженості збільшився відносно початкового на 18%. Після 10 циклів $K_{\text{п}}$ збільшився на 22,6%, після 15 – на 11%, після 20 – на 60%, після 25 – на 57%, після 30 – на 33%, після 40 – на 87% (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

Зміна коефіцієнта пошкодженості зразка в залежності від кількості циклів заморожування-відтавання при локальному впливі в частині, що не заморожувалась

К-ть циклів	0	5	10	15	20	25	30	40
$K_{\text{п}}, \text{см/см}^2$	0	0,02	0,03	0,03	0,04	0,5	0,07	0,14
$\Delta K_{\text{п}}, \%$	-	18	22	10	59	57	33	87

В цілому, коефіцієнт пошкодженості в зразках при локальному впливі (O2+) після проходження 40 циклів заморожування збільшився в 9 разів.

Аналіз частини зразка O2-, яка заморожувалась, при локальному впливі показав, що після 5 циклів заморожування коефіцієнт пошкодженості збільшився на 12%, після 10 циклів – збільшився в 1,5 рази, після 15 циклів – на 27%, на 20 циклі – на 9%, на 25 – на 12%, на 30 – на 13%. На 40 циклів заморожування коефіцієнт пошкодженості збільшився на 8% (табл. 4.7).

Коефіцієнт пошкодженості в зразках при локальному впливі (O2-) після проходження 40 циклів заморожування збільшився в 4 рази відносно початкових даних.

Отримані результати дають змогу побачити, що на 10 циклі заморожування-відтавання відбулась найінтенсивніша зміна пошкодженості в зразках при локальному типі впливу в частині, яка піддавалась заморожуванню та відтаванню (O2-).

Таблиця 4.7

Зміна коефіцієнта пошкодженості зразка в залежності від кількості циклів заморожування-відтавання при локальному впливі в частині, що піддавалась заморожуванню та відтаванню

К-ть циклів	0	5	10	15	20	25	30	40
$K_{\text{п}}, \text{см/см}^2$	0,07	0,07	0,18	0,23	0,25	0,28	0,32	0,34
$\Delta K_{\text{п}}, \%$	-	11	137	27	9	12	13	8

Зроблений аналіз дав можливість виявити зміну коефіцієнта пошкодженості зразків з розчину в залежності від типу впливу заморожування та відтавання.

Початкова пошкодженість при локальному та об'ємному впливах була ідентичною. Збільшення кількості циклів заморожування до 5 збільшило коефіцієнт пошкодженості на 78% у зразках при всебічному впливі (О1). Подальше збільшення циклів заморожування до 10 збільшило коефіцієнт пошкодженості на 38%. Після 15 циклів заморожування $K_{\text{п}}$ збільшився на 13%, після 20 циклів – на 47%, після 25 циклів – на 23%, після 30 циклів заморожування збільшення $K_{\text{п}}$ склало 42%. Після 40 циклів заморожування та відтавання коефіцієнт пошкодженості збільшився на 36% (табл. 4.8).

Коефіцієнт пошкодженості в зразках при всебічному впливі збільшився в 9 раз після проходження 40 циклів заморожування та відтавання (рис. 4.11.б). Аналіз результатів показує, що на п'ятому циклі відбулась найінтенсивніша зміна коефіцієнта пошкодженості для зразків зі всебічним впливом (рис. 4.12.б).

Коефіцієнт пошкодженості для зразків з локальним типом впливу (О2) після 5 циклів заморожування не змінився. Подальше збільшення циклів замороження до 10 збільшило коефіцієнт пошкодженості в 1,5 рази. Після 15 циклів заморожування $K_{\text{п}}$ збільшився на 24%, після 20 циклів – на 15%, після 25 – на 18%, та після 30 циклів – на 31%. Після 40 циклів заморожування та відтавання коефіцієнт пошкодженості збільшився на 21% (табл. 4.8). В цілому, коефіцієнт пошкодженості в зразках при локальному впливі після проходження 40 циклів

заморожування збільшився в 5,5 разів (рис. 4.11.a). Проаналізовані результати показують, що на 10 циклі відбулась найінтенсивніша зміна K_n (рис. 4.12.a).

Таблиця 4.8

Вплив кількості циклів заморожування-відтавання на зміну K_n

Кількість циклів	K_n при всебічному впливі, $\text{см}/\text{см}^2$	K_n при локальному впливі O_2^+ , $\text{см}/\text{см}^2$	K_n при локальному впливі O_2^- , $\text{см}/\text{см}^2$	K_n контрольних зразків, $\text{см}/\text{см}^2$
0	100	100	100	100
5	178	118	112	174
10	246	145	265	218
15	280	161	338	240
20	413	256	370	261
25	508	402	415	261
30	725	537	471	283
40	983	1009	511	283

Результати експерименту показують, що коефіцієнт пошкодженості при локальному впливі розвивається як в частині зразка, що проходила заморожування і відтавання, так і в частині, що не заморожувалась.

Аналіз результатів показав якісні та кількісні структурні зміни матеріалу, що відбувались в зразку протягом циклів заморожування-відтавання. Можна зробити висновок, що вже після п'яти циклів заморожування та відтавання в зразку відбуваються структурні зміни, які в процесі подальших циклів заморожування накопичуються. Також аналіз результатів показав, що коефіцієнт пошкодженості зразків після 40 циклів заморожування-відтавання при локальному впливі має

однаковий результат як для зони з плюсовою температурою так і для зони від'ємної температури.

4.5. Вплив умов заморожування на зміну фізичних характеристик зразків з розчину

4.5.1. Зміна маси та водопоглинання

Результати аналізу в розділі 4 п.4.2 дали можливість оцінити вплив всебічного і однобічного циклічного заморожування зразків з цементного каменю на зміну маси та водопоглинання.

Зміна маси та водопоглинання є результатом структурних змін, які відбуваються в зразку в процесі циклів заморожування. При зміні структурних складових реакція на зовнішні впливи буде змінюватись.

При оцінці морозостійкості всіх будівельних матеріалів особливу увагу приділяють зміні маси зразків (ДСТУ Б В.2.7-47-96), тому що зменшення маси є відображенням часткового руйнування зразків. В зв'язку з цим аналіз зміни маси зразків вважається дієвим методом оцінки морозостійкості в умовах різних типів заморожування. Відповідно, була поставлена задача вивчення та аналізу зміни маси та водопоглинання матеріалу в залежності від виду впливу заморожування та відтавання зразків з розчину.

Методика, описана в розділі 2, дає змогу отримати достовірні результати та оцінити той вплив на структуру, який відбувається під час проходження циклів заморожування та відтавання.

Зміна водопоглинання та маси зразків при багаторазових змінах температури свідчить про зміну структури. В зразках одночасно відбувається два процеси: збільшення внутрішнього простору в зв'язку з проходженням циклів заморожування та відтавання і заповнення цього простору кристалами солі, які під дією вологи і температури активують свій ріст.

Контролювання зміни маси та водопоглинання дозволить більш детально оцінити процеси деструкції, що відбуваються в зразках при різних видах впливу заморожування та відтавання.

Експериментальні дослідження на зразках з розчину показали, що зі збільшенням кількості циклів заморожування маса зразків, що проходили заморожування та відтавання всебічно (O1), після 20 циклів збільшилась на 3,3%, а зразків після локального впливу – на 2,1% (рис. 4.13. а).

Збільшення кількості циклів заморожування до 40 призводить до збільшення маси зразків на 5% при локальному та всебічному впливі заморожування та відтавання (рис. 4.13.а.).

На рис. 4.14 відображена залежність зміни коефіцієнта пошкодженості та водопоглинання від кількості циклів заморожування-відтавання для зразків з розчину. При аналізі спостерігається процес догідратації цементних зерен в контрольних зразках. Про це свідчить зменшення водопоглинання при незмінному коефіцієнті пошкодженості.

Зменшення водопоглинання після проходження циклів заморожування опосередковано свідчить про ріст кристалів солі в зразку. Після 40 циклів всебічного заморожування водопоглинання зразків зменшилось на 18%, в той час як після локального впливу – на 24% (табл. 4.9).

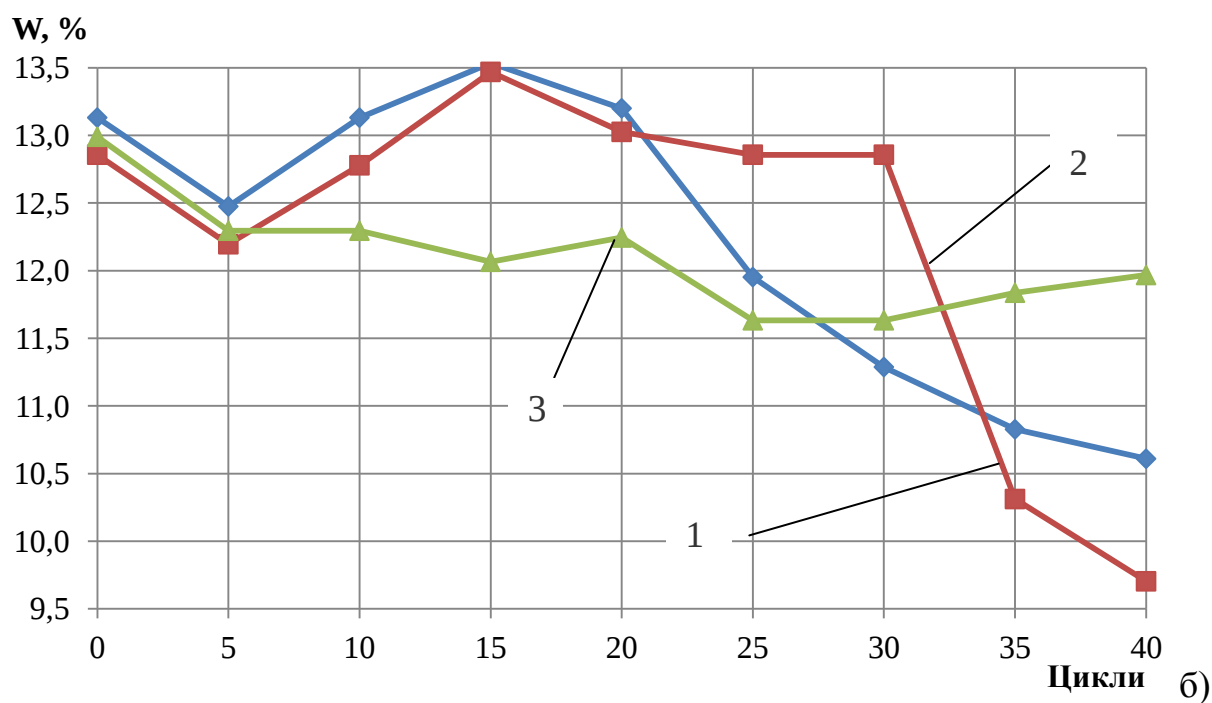
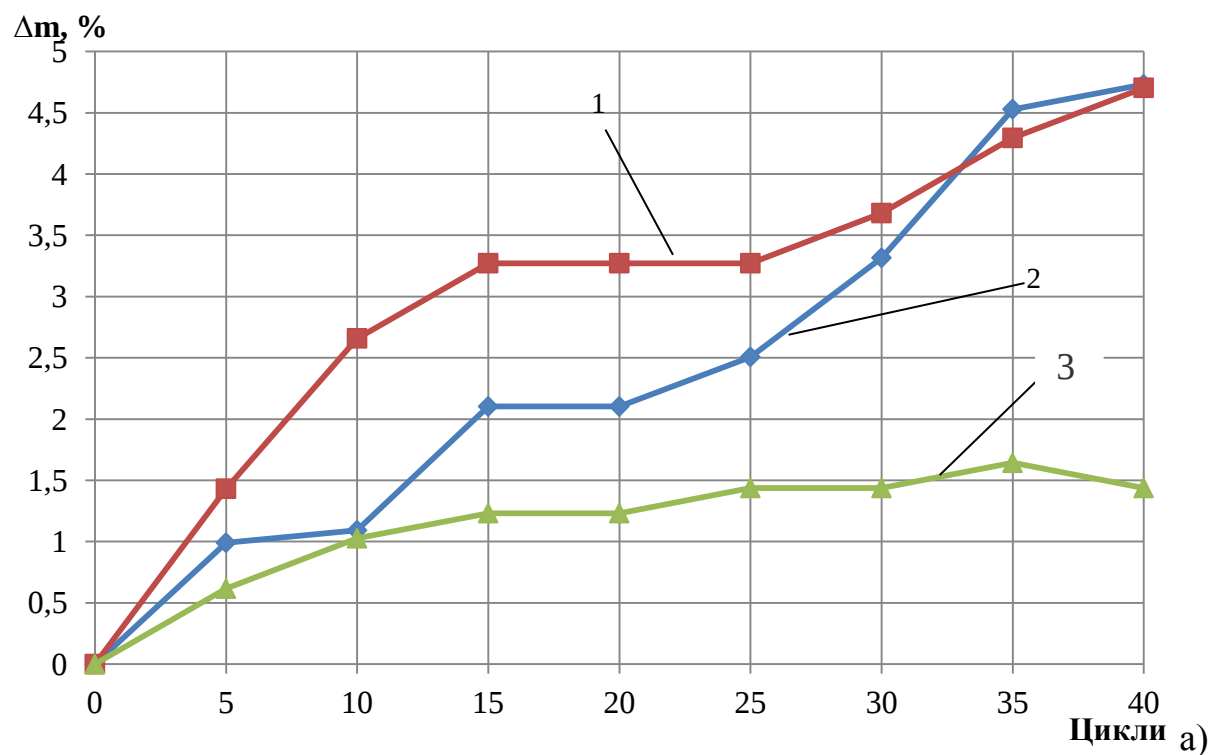


Рис. 4.13. Вплив умов заморожування зразків з розчину в залежності від кількості циклів заморожування-відтавання на зміну:

а) маси (Δm %);

б) водопоглинання (W %);

1 – при всебічному впливі; 2 – при однобічному впливі; 3 – контрольні зразки

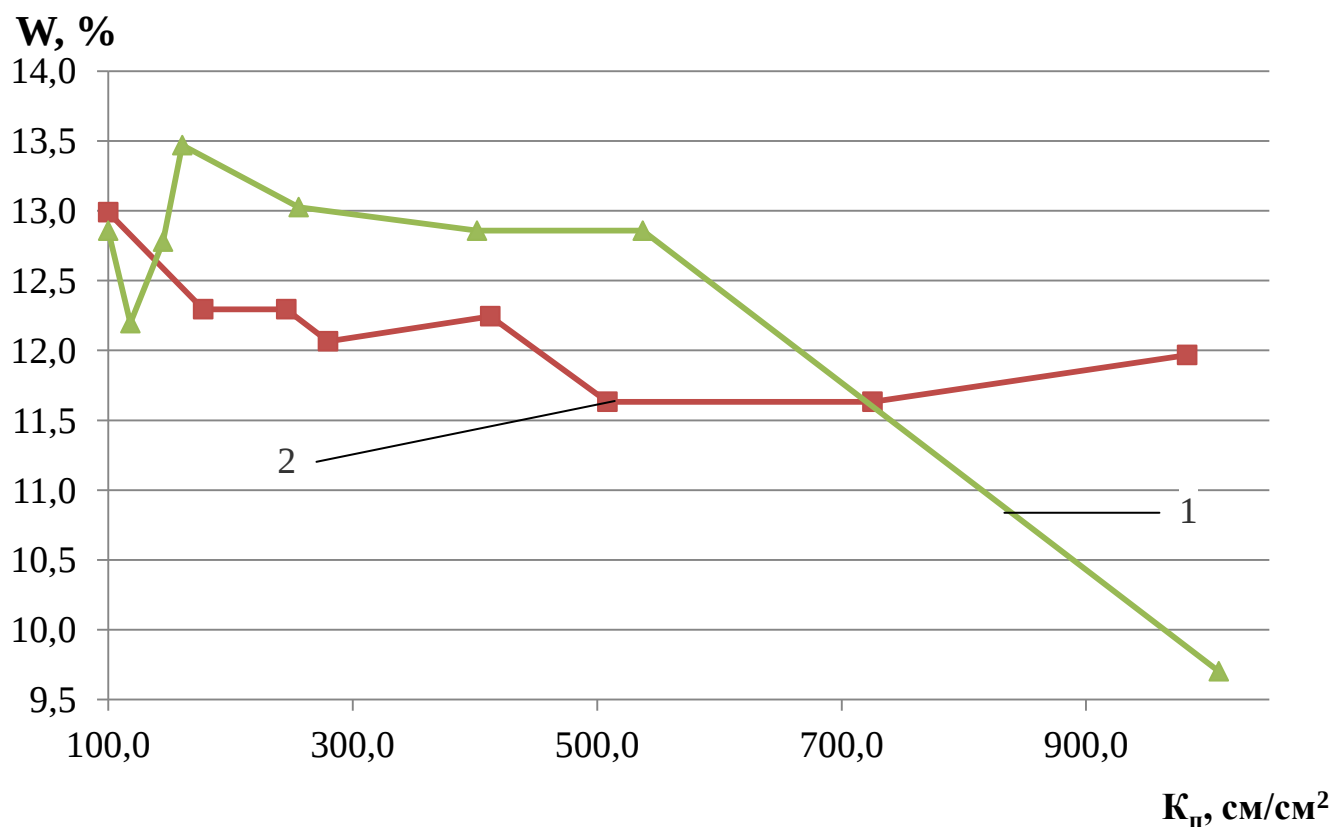


Рис. 4.14. Порівняльний аналіз зміни коефіцієнтів пошкодженості і зміни водопоглинання зразків в умовах заморожування та відтавання

1 – при всебічному впливі; 2 – при однобічному впливі

Таблиця 4.9

Порівняльний аналіз зміни коефіцієнтів пошкодженості і зміни водопоглинання зразків в різних умовах заморожування та відтавання

Кількість циклів	Всебічний вплив		Локальний вплив	
	W, %	K _п , см/см ²	W, %	K _п , см/см ²
0	13,1	100	12,9	100
5	12,5	178	12,2	115
10	13,1	246	12,8	205
15	13,8	280	13,5	249
20	13,2	413	13,2	313
25	12	508	12,0	408
30	11,3	725	10,8	504
40	10,8	983	10,6	760

Аналіз показав, що зменшення водопоглинання зі збільшенням K_n свідчить про новоутворення, які з'явилися в процесі проходження циклів заморожування. Після 30 циклів заморожування настає момент балансу – водопоглинання не змінюється, в той час як коефіцієнт пошкодженості продовжує зростати. Це момент, коли нові несучільності розвиваються подібно з кристалами солі в зразку. Після 35 циклів заморожування починається збільшення водопоглинання при збільшенні коефіцієнта пошкодженості – це свідчення домінування процесу кристалізації солі в зразку (рис. 4.14).

На рис. 4.14 відображенні результати порівняння зміни коефіцієнтів пошкодженості і зміни водопоглинання зразків в різних умовах заморожування та відтавання. Для зразків, що піддаються локальному впливу заморожування зміна K_n та W має нелінійний характер. В зразках, що піддаються всебічному впливу замороження, при проходженні циклів заморожування-відтавання відбуваються два різноспрямованих процеси: утворення несучільностей при впливі зовнішніх чинників та їх заповнення кристалами солі, яка кристалізується в процесі заморожування та відтавання.

Зміна водопоглинання зразків після циклів заморожування-відтавання є свідченням внутрішньої зміни структури. Аналіз результатів показав, що зразки після однобічного або всебічного впливів змінювали водопоглинання по-різному, але кінцевий результат на 40 цикл був ідентичний.

Проведене дослідження дало можливість оцінити вплив всебічного і однобічного заморожування на зміну водопоглинання та маси зразків з розчину [71].

4.5.2. Вплив умов заморожування на зміну швидкості проходження ультразвуку в зразках з розчину

Швидкість проходження ультразвуку крізь матеріал залежить від його структури. Як результат, структура впливає на розповсюдження звукової енергії. Наявність в матеріалі несучільностей відображається в швидкості ультразвуку.

Поява нових або ріст існуючих несучільностей також мають відображатися в швидкості проходження ультразвуку. Проведені дослідження зміни швидкості проходження ультразвуку крізь зразки з цементного каменю після циклів заморожування-відтавання показали різну інтенсивність зміни швидкості ультразвуку за різних умов замороження зразків. Це дає підстави вважати, що в зразках з розчину буде відбуватись подібний ефект. Зміна швидкості ультразвуку слугує опосередкованим доказом незворотних змін структури матеріалу в умовах періодичного заморожування та відтавання.

Дослідження зразків з розчину проводилось аналогічно дослідженню зразків з цементного каменю.

Проаналізувавши отримані результати можна оцінити зміну швидкості проходження ультразвуку в зразку в двох базах:

- вздовж (L) – база 160 мм,
- поперечно (a) – база 40 мм.

Аналіз показав, що в зразках, які проходили циклічне заморожування всебічно ($O1$), в базі L після 20 циклів швидкість ультразвуку зменшилась на 9%. В базі a швидкість ультразвуку зменшилась на 5% (рис. 4.15.а).

Окремий аналіз частини зразка $O2$ - після 20 циклів заморожування показав збільшення швидкості ультразвуку на 2%. На 40 циклі заморожування швидкість ультразвуку збільшилась на 10% (рис. 4.15. б).

Подальше збільшення кількості циклів заморожування до 40 призводить до зниження швидкості проходження ультразвуку в зразках: в базі L швидкість ультразвуку зменшилась на 4%, в базі a – на 6% (табл. 4.10).

При однобічному впливі заморожування в зразках з розчину в базі L після 20 циклів заморожування швидкість ультразвуку збільшилась на 5%, а після 40 циклів – на 9% (рис. 4.15.а).

При однобічному впливі ($O2+$) після 20 циклів заморожування в зразках з розчину в базі a швидкість проходження ультразвуку збільшилась на 8%. При збільшенні кількості циклів до 40 швидкість ультразвуку збільшилась на 10% (табл. 4.8.).

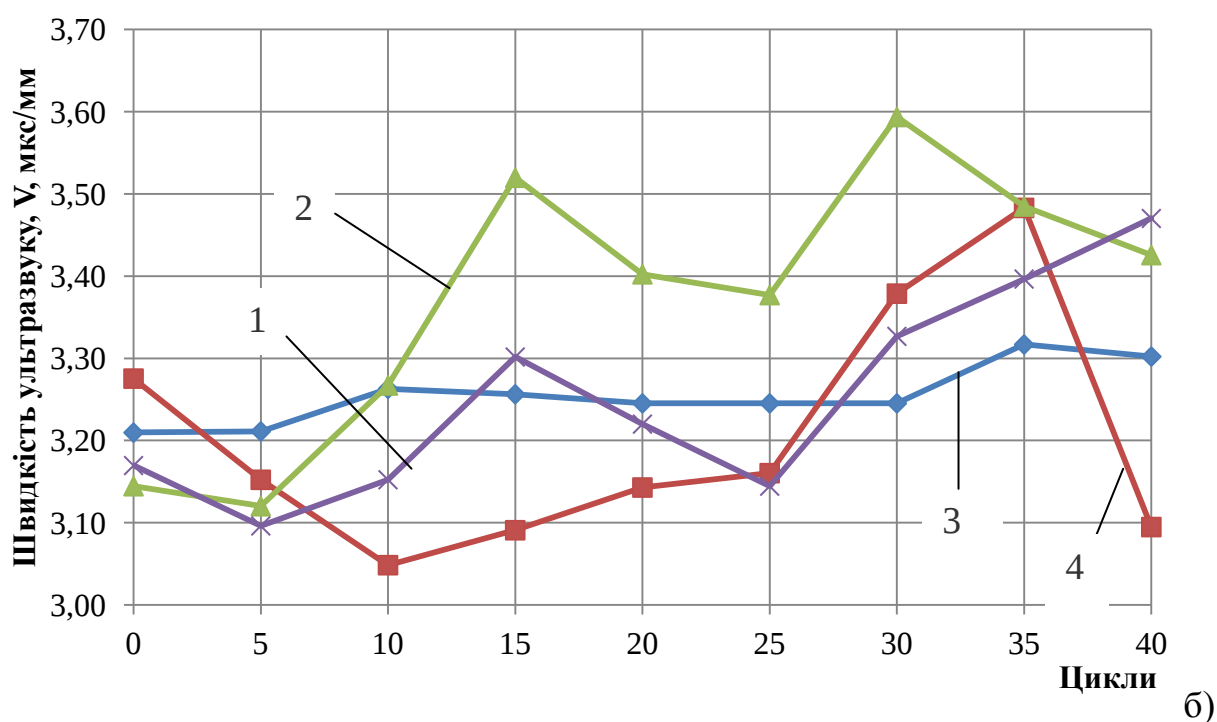
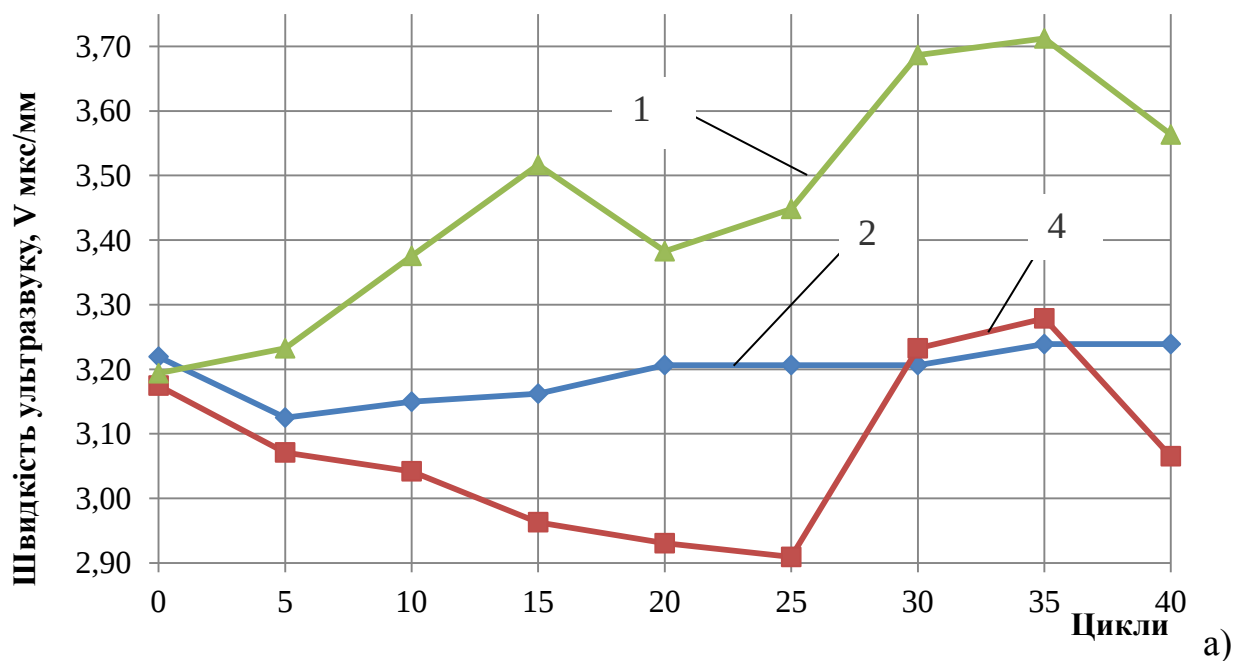


Рис. 4.15. Вплив умов заморожування на зміну швидкості проходження ультразвуку в зразках:

а) поперечно (а);

б) вздовж (L);

1 – половина зразка, що заморожувалась при локальному впливі; 2 – половина зразка, що не заморожувалась при локальному впливі; 3 – контрольні зразки; 4 – зразки, що заморожувались всебічно

Таблиця 4.10

Порівняльний аналіз зміни коефіцієнтів пошкодженості і зміни швидкості ультразвуку в зразках при різних умовах заморожування та відтавання

Кількість циклів	Всебічний вплив		Локальний вплив O2+		Локальний вплив O2-		Контрольні зразки	
	K _п , см/см ²	V, мкс/мм	K _п , см/см ²	V, мкс/мм	K _п , см/см ²	V, мкс/мм	K _п , см/см ²	V, мкс/мм
0	100	3,28	100	3,14	100	3,17	100	3,17
5	178	3,10	118	3,10	112	3,10	174	3,21
10	246	3,05	145	3,26	265	3,15	218	3,26
15	280	3,09	161	3,52	338	3,30	240	3,26
20	413	3,14	256	3,40	370	3,22	261	3,22
25	508	3,16	402	3,38	415	3,14	261	3,25
30	725	3,38	537	3,59	471	3,33	283	3,25
40	983	3,09	1009	3,47	511	3,43	283	3,3

Результати за зміною маси підтверджуються зміною швидкості проходження ультразвуку. При використанні 5% сольового розчину в зразках починається кристалізуватись сіль, яка в свою чергу заповнює внутрішні поверхні розділу та збільшує швидкість проходження ультразвуку. Це свідчить про те, що в зразку в процесі заморожування та відтавання одночасно відбуваються процеси утворення (догідратація реліктових зерен, кристалізація солі) та деструкції (руйнування в наслідок заморожування води). На рис. 4.16 можна спостерігати в який момент в процесі циклічного заморожування-відтавання який з процесів домінує.

Зміна складу КБМ привела до зміни реакції на циклічне заморожування та відтавання. В зразках з цементного каменю вже після 5 циклів почалось зниження швидкості ультразвуку, в той час як в зразках з розчину показники швидкості ультразвуку мали косинусоїдний вигляд. Це відбувається за рахунок процесів, які відбуваються в зразку при проходженні циклічного заморожування та відтавання в 5% сольовому розчині (рис. 4.16).

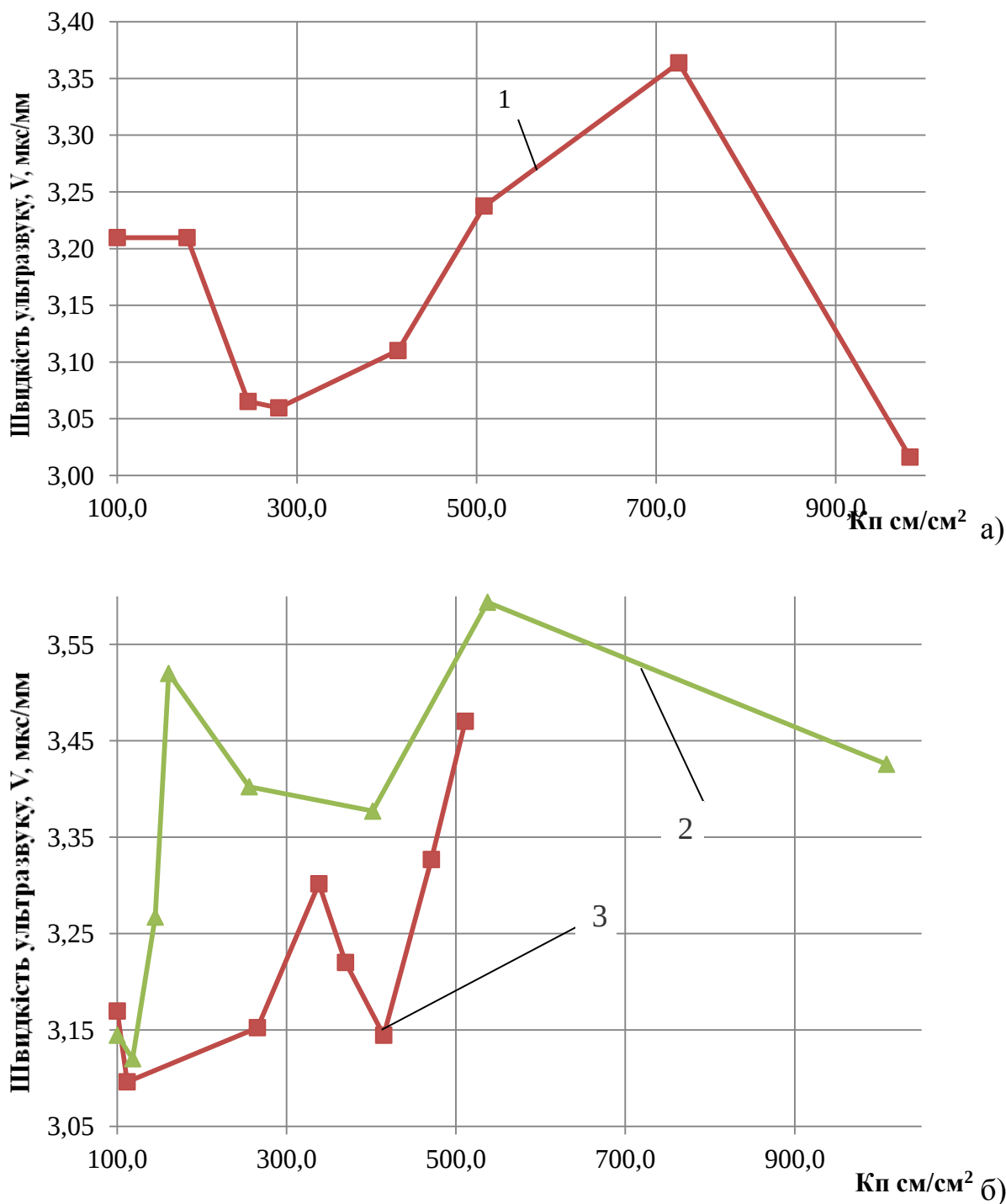


Рис. 4.16. Порівняльний аналіз зміни коефіцієнтів пошкодженості і зміни швидкості проходження ультразвуку в зразках при різних умовах заморожування та відтавання:

1 – зразки, що заморожувались всебічно; 2 – половина зразка, що не заморожувалась при локальному впливі; 3 – половина зразка, що заморожувалась при локальному впливі

Результати аналізу швидкості проходження ультразвуку дають змогу оцінювати структурні зміни в зразку при різному виді заморожування та відтавання та проаналізувати дію процесів деструкції та утворення в кінетиці проходження циклічного заморожування-відтавання.

4.6. Вплив умов заморожування на зміну механічних характеристик та морозостійкість розчину

Проведені дослідження з впливу умов заморожування зразків з розчину на зміну K_n , маси, водопоглинання, швидкості проходження ультразвуку дають змогу припустити, що збережеться вплив на зміну характеристик міцності. Тому подальша робота була присвячена дослідженню міцності і стійкості зразків з розчину.

Міцність матеріалу визначалась згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009 "Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками".

Міцність на розтяг при згині зразків з розчину, що проходили заморожування та відтавання всебічно (O1), на 40 циклі знизилась на 50%, а при локальному впливі (O2) – на 21,2%. В контрольних зразках показники міцності на розтяг при згині підвищились на 5,2% в порівнянні з міцністю зразків у віці 28 діб (табл. 4.11).

Міцність на стиск частин зразків, що не проходили заморожування та відтавання (O2+) на 40 циклі знизилась на 21,4%, частин, що проходили заморожування та відтавання (O2-) – на 37%, зразків з всебічним впливом – на 36,6% (табл. 4.11).

Коефіцієнт стійкості зразків на 40 циклі заморожування-відтавання, що проходили всебічне заморожування та відтавання, зменшився на 35%. Коефіцієнт стійкості зразків, що проходили заморожування при локальному впливі, знизився на 37% та на 22% в частинах O2- та O2+ відповідно. Коефіцієнт стійкості контрольних зразків на момент 40 циклу порівняно з результатами у віці 28 діб зменшився на 11% (табл. 4.12, рис. 4.17).

Таблиця 4.11

Характеристики міцності після 40 циклів заморожування та відтавання

Вид мех. характеристик Вид впливу	На розтяг при згині, $f_{c,tf}$, МПа	На стиск, $f_{c,tk}$, МПа
Всебічний вплив (O1)	2,6	29
Локальний вплив (O2+)	4,1	33,6
Локальний вплив (O2-)		27,1
Контрольні зразки	5,1	39,4

Таблиця 4.12

Характеристики стійкості після 40 циклів заморожування та відтавання

Вид мех. характеристик Вид впливу	На розтяг при згині	На стиск
Всебічний вплив (O1)	0,5	0,63
Локальний вплив (O2+)	0,78	0,79
Локальний вплив (O2-)		0,63
Контрольні зразки	0,97	0,92

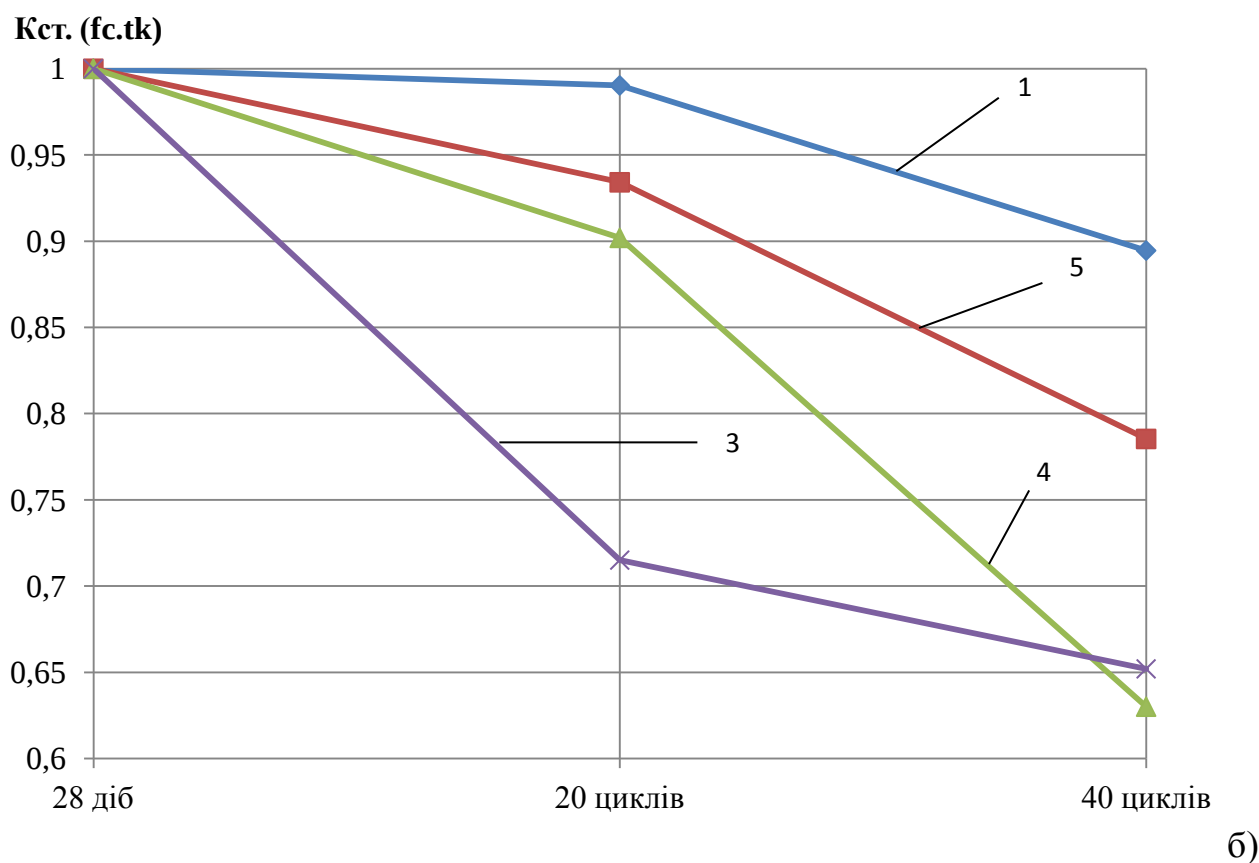
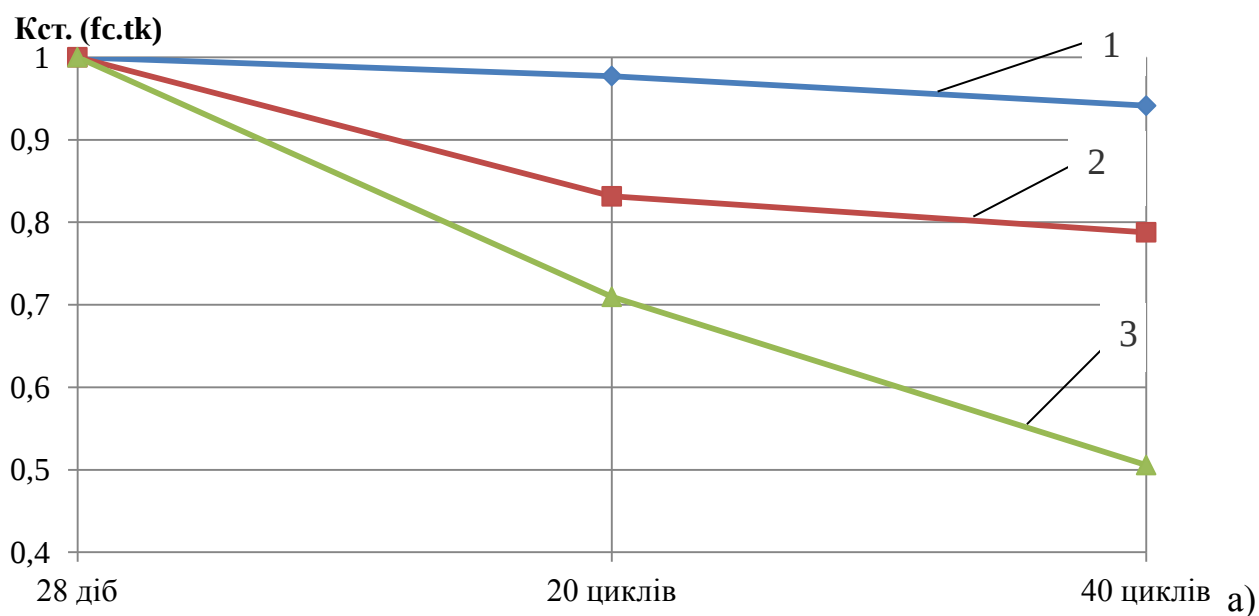


Рис. 4.17 Вплив умов заморожування на зміну коефіцієнта стійкості зразків з розчину: а) на розтяг при згині; б) на стиск;

1 – контрольні зразки; 2 – зразки, що заморожувались локально; 3 – зразки, що заморожувались всебічно; 4 – половина зразка, що заморожувалась; 5 – половина зразка, що не заморожувалась

Виконані дослідження дали можливість оцінити вплив всебічного і однобічного заморожування зразків на зміну фізико-механічних характеристик цементно-піщаного розчину. Міцність на розтяг при згині зразків при всебічному заморожуванні знизилась на 50%, а при однобічному – на 21%. Міцність на стиск при всебічному заморожуванні зменшилась на 37%, а при однобічному – в середньому на 30%.

Результати проведених експериментів дали можливість наочно побачити, що при різних типах впливу від'ємних температур зміна стійкості відбувається не однаково [100, 102, 103, 104, 161].

Висновки за 4-м розділом

1. Аналіз результатів показав якісні та кількісні структурні зміни, що відбувались в зразку протягом проходження циклів заморожування-відтавання. Вже після п'яти циклів заморожування та відтавання як при однобічному так і при всебічному впливі в зразку відбуваються незворотні структурні зміни, які протягом подальших циклів заморожування-відтавання накопичуються. Коефіцієнт пошкодженості в зразках з локальним впливом має однаковий результат як для частини зразків, що знаходилась в зоні з плюсовою температурою, так і для частини зразків, що заморожувалась.

2. Збільшення маси зразків як з розчину, так і з цементного каменю, при циклічному заморожуванні-відтаванні незалежно від виду впливу опосередковано свідчить про ріст кристалів солі в зразку. Зміна водопоглинання зразків в залежності від кількості циклів заморожування-відтавання є свідченням внутрішньої зміни структури матеріалу. Аналіз результатів показав, що водопоглинання зразків при дії однобічного та всебічного впливів змінювалось по-різному. В зразках з цементного каменю водопоглинання при однобічному впливі збільшилось на 21 %, з розчину – зменшилось на 24%. При всебічному впливі в зразках з цементного каменю водопоглинання збільшилось на 24%, з розчину – зменшилось на 18%.

Швидкість проходження ультразвуку в зразках з цементного каменю та розчину вже після 5 циклів почала частково знижуватись, що також свідчить про незворотні зміни структури матеріалу. Результати аналізу швидкості проходження ультразвуку дають змогу оцінювати структурні зміни в зразку в процесі заморожування та відтавання.

3. Результати дослідження показали, що міцність на розтяг при згині зразків з цементного каменю, що піддавались всебічному заморожуванню та відтаванню, зменшилась на 54%, тоді як цей показник зразків, що піддавались заморожуванню та відтаванню в локальній частині, зменшився на 44%.

Міцність на стиск зразків при всебічному впливі заморожування-відтавання зменшилась на 43%. При однобічному впливі цей показник в частині зразка, яка не заморожувалась, зменшився на 27%, а в частині зразка, яка заморожувалась, – на 40%.

Міцність на розтяг при згині зразків з розчину, що проходили заморожування та відтавання всебічно, на 40 циклі знизилась на 50%, а при локальному впливі – на 21,2%.

Міцність на стиск частин зразків, що не проходили заморожування та відтавання на 40 циклі знизилась на 21,4%, частин, що проходили заморожування та відтавання – на 37%, зразків з всебічним впливом – на 36,6%.

4. Результати досліджень, що викладені у даному розділі, опубліковані у роботах [24, 98, 99, 100, 102, 103, 104, 105, 108].

РОЗДІЛ 5

ВПЛИВ УМОВ ЗАМОРОЖУВАННЯ НА ЗМІНУ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНУ

Бетон – композиційний матеріал, що складається з в'язучого, крупного заповнювача, наповнювача та різноманітних добавок. Під наповнювачами розуміються компоненти бетону довільних форм і поверхневої активності, розмір яких викликає в оточуючому матричному матеріалі мимовільне власне поле деформацій і напружень при їх взаємодії як на етапі формування бетону, так і при дії на нього експлуатаційних навантажень. Між розчинною частиною і наповнювачами при гідратації виникають фізико-хімічні та фізико-механічні взаємодії з утворенням поверхонь розділу. Поверхня розділу визначає властивості композита через модифікацію власних властивостей і через можливість певним чином розподіляти внутрішні деформації та напруги між окремими компонентами.

Проведений аналіз в розділі 4 показав, що зміна структури цементного каменю та розчину залежить від типу впливу заморожування-відтавання та відбувається по-різному. Структурні зміни також відбуваються зі збільшенням кількості циклів заморожування-відтавання.

В зв'язку з тим, що складова бетону включає в себе цемент та пісок як інгредієнтні матеріали, для останнього етапу вивчення типу впливу заморожування та відтавання на цементновмісні матеріали були обрані зразки з бетону. Вивчення бетону як окремого матеріалу дасть змогу детально розглянути різний вплив заморожування та відтавання на характеристики матеріалу. Це, в свою чергу, ставить задачу: дослідити вплив умов заморожування та відтавання бетонних зразків на зміну структури, фізичних та фізико-механічних показників.

5.1. Вплив умов заморожування на зміну коефіцієнту пошкодженості бетону

Аналіз умов експлуатації показав, що бетонні вироби і конструкції сприймають однобічне зволоження і заморожування (розділ 3).

Значна кількість циклів однобічного заморожування і відтавання може призвести до необоротної зміни структури матеріалу, що в свою чергу викликає зміни властивостей будівельних виробів і конструкцій інакше від всебічного впливу.

Як вже було сказано, у будь-якому виробі і конструкції присутні технологічні тріщини на різних рівнях структурних неоднорідностей. Тріщина, за визначенням, викликає нерівномірний розподіл напружень в обсязі матеріалу з їх концентрацією у гирла.

В силу того, що руйнування відбувається шляхом розвитку тріщин, можна зробити висновок, що аналіз зміни коефіцієнта пошкодженості дозволить простежити історію еволюції структури протягом усього життєвого циклу конструкції. У зв'язку з цим була визначена задача дослідження: проаналізувати вплив умов заморожування на зміну структурних параметрів мікроструктури цементного каменя.

Отримані результати експерименту були занесені до таблиць, на підставі значень сформовано графіки, на яких можна наглядно побачити зміну коефіцієнта пошкодженості відносно проходження циклів та виду впливу заморожування та відтавання.

Кількісна оцінка структурних змін отримувалась завдяки оцінці коефіцієнту пошкодженості. Було досліджено три групи зразків з бетону для різного впливу розміром $10 \times 10 \times 40$ см та $10 \times 10 \times 10$ см. Методика досліджень приведена в розділі 2.3.2. Результати фіксувались після кожних 5 циклів заморожування та відтавання.

Використовуючи метод підрахунку K_n , було якісно та кількісно проаналізовано зміну структури в залежності від умов заморожування.

Отримані дані дали змогу побудувати графік впливу кількості циклів заморожування та відтавання на зміну коефіцієнта пошкодженості при різних типах впливу для зразків-призм (рис. 5.1) та зразків-кубів (рис. 5.2). Аналіз отриманих результатів показав вплив кількості циклів заморожування та відтавання на зміну коефіцієнту пошкодженості. Коефіцієнт пошкодженості в зразках з всебічним впливом після 40 циклів заморожування-відтавання збільшився в 4 рази (табл. 5.1).

Після 8 циклів заморожування-відтавання в зразках з всебічним впливом коефіцієнт пошкодженості збільшився в два рази. При подальшому збільшенні циклів заморожування-відтавання до 13 коефіцієнт пошкодженості збільшився ще на 20%. На 20 циклі K_{π} збільшився на 3%, на 25 циклі – на 47%, на 30 циклі – на 23%. На 40 циклі заморожування збільшення K_{π} склало 42%. Проаналізовані результати дослідження показують, що на 8 циклі відбулась найінтенсивніша зміна K_{π} (рис. 5.3).

Для оцінки локального впливу зразок з бетону ділився на дві частини, які знаходились в різних температурних діапазонах. Тому для детального аналізу доцільно проаналізувати зміну коефіцієнта пошкодженості для обох частин індивідуально (O2+ та O2-).

Проведений аналіз частини, яка не проходила заморожування (O2+) в зразку з локальним впливом показав, що після 8 циклів заморожування та відтавання коефіцієнт пошкодженості не змінився. Після 13 циклів K_{π} збільшився на 13%, після 20 циклів – на 133%, після 25 циклів – на 5%, після 30 – на 11%. Після 40 циклів заморожування-відтавання K_{π} збільшився на 8% (табл. 5.2). Коефіцієнт пошкодженості в зразках при локальному впливі (O2+) після 40 циклів заморожування збільшився в 3 рази.

Отримані результати дають змогу побачити, що на 20 циклі відбулась найінтенсивніша зміна K_{π} (рис. 5.3) в частині O2+.

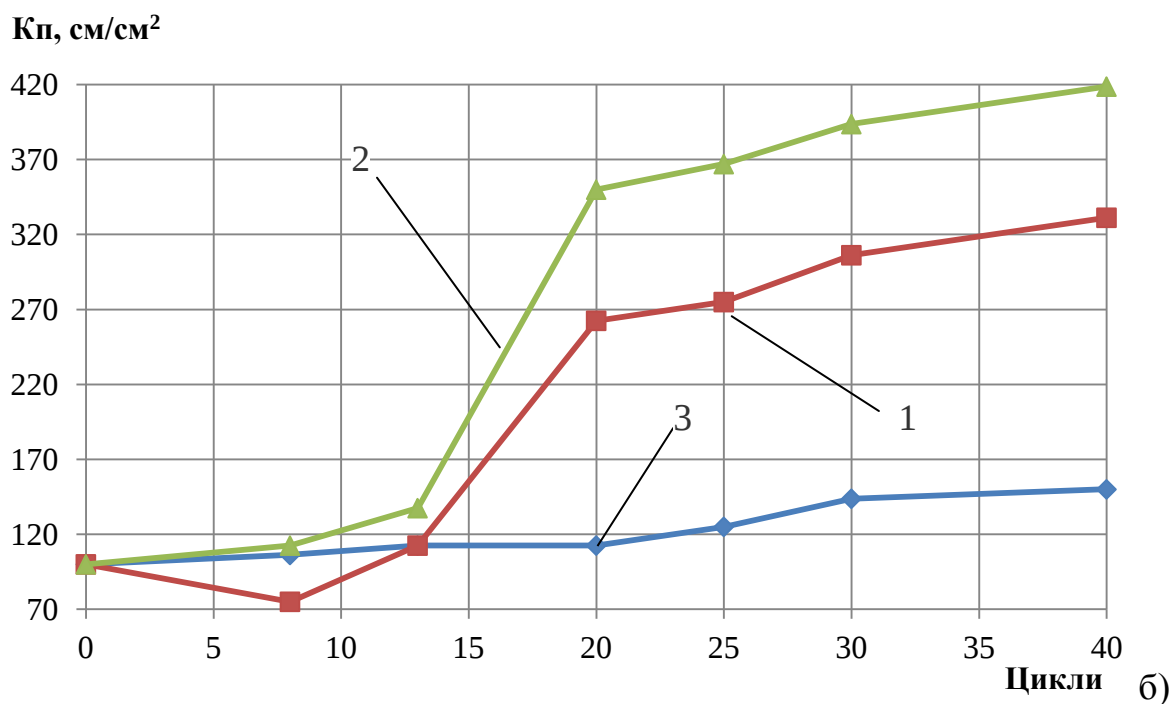
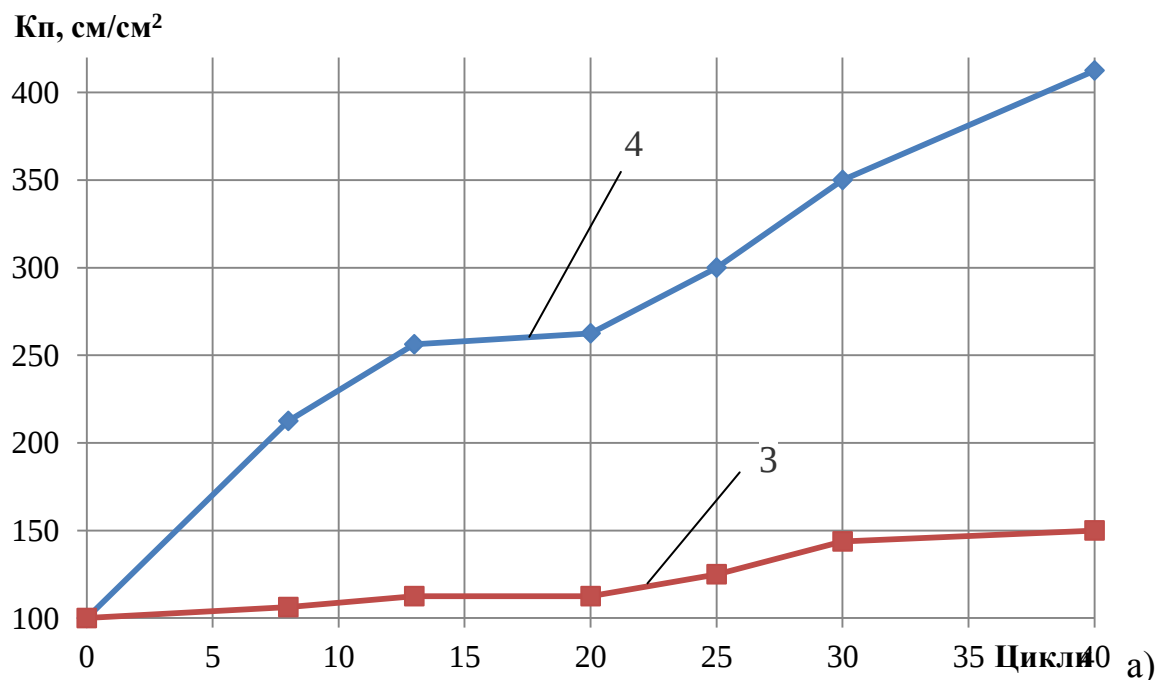


Рис. 5.1. Вплив кількості циклів заморожування та відтавання на зміну K_p в зразках з бетону при: а) локальному впливі; б) об'ємному впливі;

1 – половина зразка, що проходила заморожування; 2 – половина зразка, що не проходила заморожування; 3 – контрольні зразки; 4 – зразки, що проходили заморожування всебічно.

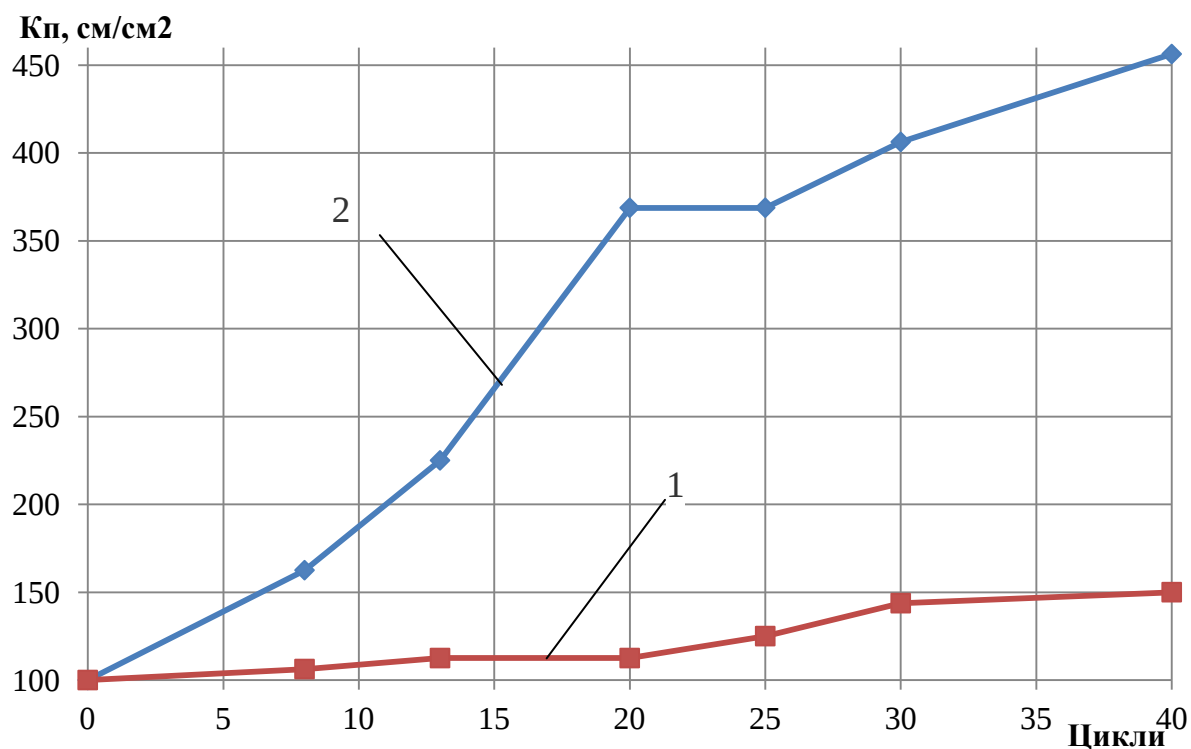


Рис. 5.2. Вплив кількості циклів заморожування та відтавання на зміну K_p в зразках-кубах: 1 – контрольні зразки; 2 – зразки-куби, що проходили заморожування всебічно

Таблиця 5.1

Вплив кількості циклів заморожування-відтавання на зміну K_p зразків-призм

Кількість циклів	Всебічний вплив K_p , см/см ²	Локальний вплив O2+ K_p , см/см ²	Локальний вплив O2- K_p , см/см ²	Контрольні зразки K_p , см/см ²
0	100	100	100	100
8	213	75	113	106
13	256	113	138	113
20	263	263	350	113
25	300	275	367	125
30	350	306	394	144
40	413	331	419	150

Аналіз частини О2-, яка проходила заморожування в зразку з локальним впливом, показав, що після 8 циклів заморожування-відтавання коефіцієнт пошкодженості збільшився на 12%. Після 13 циклів K_{Π} збільшився ще на 22%, після 20 циклів коефіцієнт пошкодженості ще збільшився в 1,5 рази. На 25 циклі заморожування-відтавання K_{Π} збільшився на 5%, на 30 циклі – на 8%. На 40 циклі коефіцієнт пошкодженості збільшився ще на 7% (табл. 5.2).

В цілому, коефіцієнт пошкодженості в зразках при локальному впливі (О2-) після 40 циклів заморожування збільшився в 4,2 рази відносно початкових даних.

Отримані результати дають змогу побачити, що на 20 циклі відбулась найінтенсивніша зміна пошкодженості (рис. 5.3) в зразках з локальним типом впливу в частині, яка проходила заморожування та відтавання (О2-) [70].

Таблиця 5.2

Зміна коефіцієнта пошкодженості в залежності від кількості циклів
заморожування-відтавання та типу впливу

При всебічному впливі, цикли													
0		8		13		20		25		30		40	
K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}
0,16	-	0,34	112	0,41	20,5	0,42	2,5	14	47	17	23	18	42
При локальному впливі в частині, що не проходила заморожування та відтавання, цикли													
0		8		13		20		25		30		40	
K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}
0,16	-	0,16	0	0,18	13	0,4	133	0,5	4,7	0,49	11	0,53	8
При локальному впливі в частині, що проходила заморожування та відтавання, цикли													
0		8		13		20		25		30		40	
K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}	K_{Π}	ΔK_{Π}
0,16	-	0,18	13	0,12	22	22	154	0,6	4,8	0,63	7,2	0,67	6,3

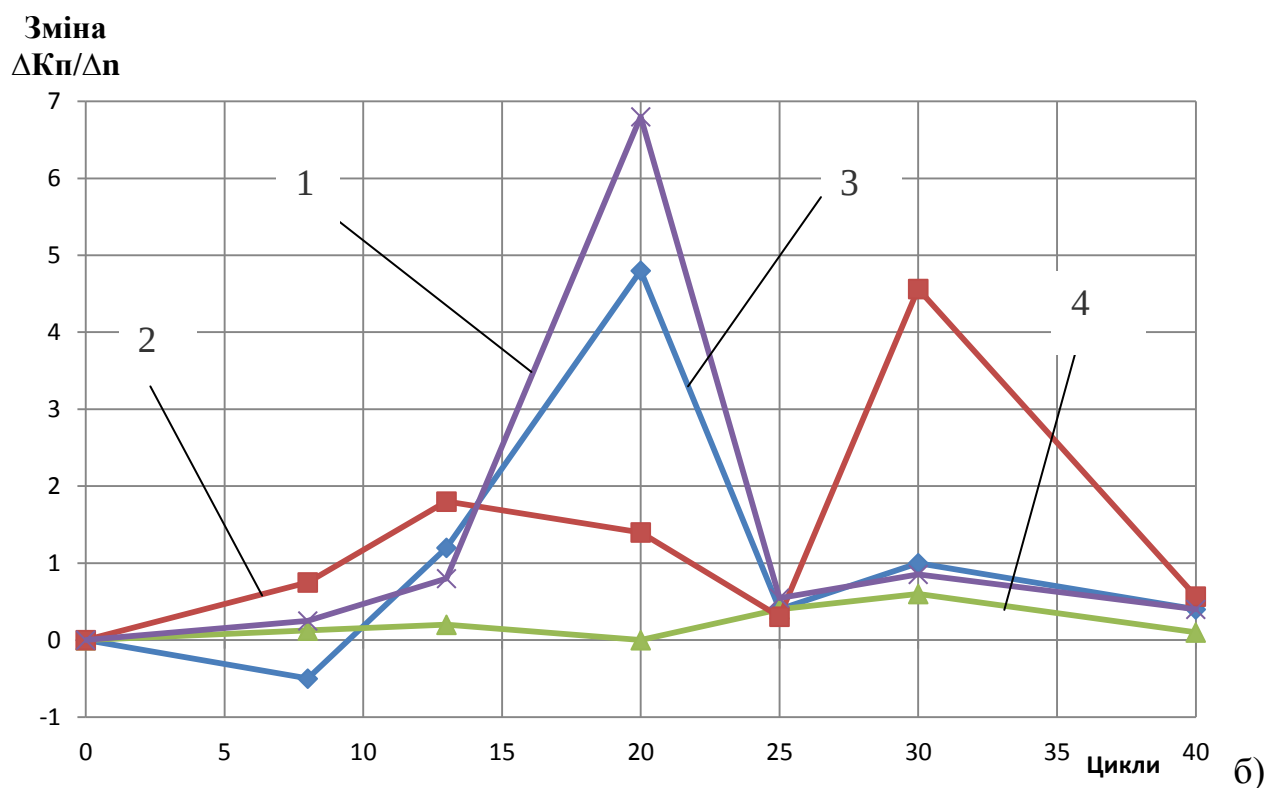
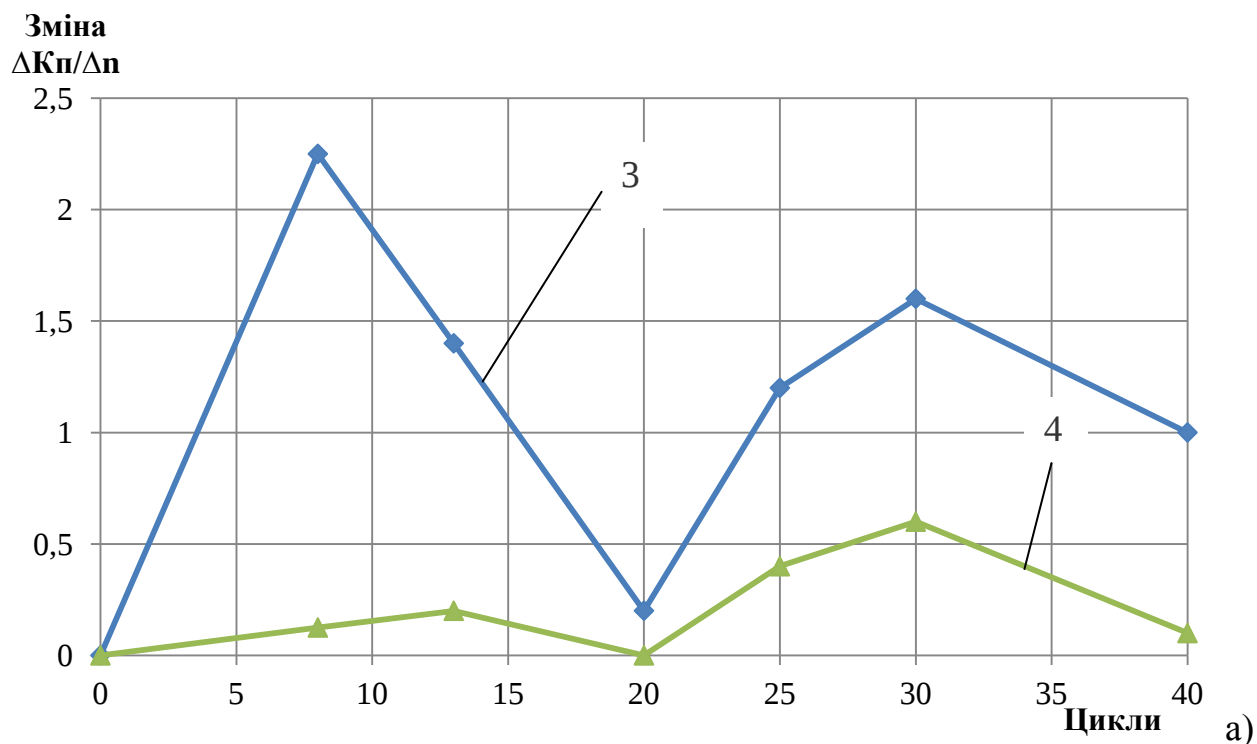


Рис. 5.3. Вплив умов заморожування на кінетику зміни K_p при: а) локальному впливі; б) об'ємному впливі;

1 – половина зразка, що проходила заморожування; 2 – половина зразка, що не проходила заморожування; 3 – зразки, що проходили заморожування всебічно; 4 – контрольні зразки

Оскільки частина зразків проходила заморожування та відтавання лише з одного боку, то доцільно було зафіксувати індивідуально зміну коефіцієнта пошкодженості в різних половинах зразка та порівняти зі зразком, що проходив всебічне заморожування.

Зразки-куби проходили циклічне всебічне заморожування та відтавання одночасно зі зразками-призмами. Відображення зміни коефіцієнту пошкодженості в зразках-кубах наочно дає змогу побачити відповідність реальних умов заморожування прописаним в нормативних документах. Результати зміни коефіцієнту пошкодженості в зразках-кубах показали, що K_n збільшився в 3 рази після проходження 40 циклів заморожування-відтавання.

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що коефіцієнт пошкодженості зразків, які були від впливом локального заморожування, після 40 циклів був меншим ніж при всебічному впливі.

Знакозмінні об'ємні деформації матеріалу, що виникають за рахунок періодичної зміни температури і тиску льоду, ведуть до зміни структури, що, в свою чергу, відображається у коефіцієнті пошкодженості.

5.2. Вплив умов заморожування на зміну фізичних характеристик бетону

5.2.1. Вплив умов заморожування на зміну маси та водопоглинання

Проведений аналіз коефіцієнтів пошкодженості дав можливість проаналізувати зміну структури ззовні зразка. Поверхнева структура матеріалу не завжди збігається з внутрішньою, тобто не завжди можливо оцінити зміну структури всього матеріалу лише опираючись на зміну коефіцієнту пошкодженості. Факт зміни водопоглинання та маси сам по собі свідчить про наявність зміни структури. Дана характеристика є однією з основних, які використовуються в нормативних документах для аналізу стійкості матеріалу до морозного руйнування. В зв'язку з цим була поставлена задача: встановити

залежність між зміною фізичних характеристик (водопоглинання та маси) бетону та умовами заморожування зразків.

У зразках на основі цементу постійно відбувається збільшення маси за рахунок гідратації недогідратованих зерен цементу. Під час проходження циклів заморожування та відтавання, процес збільшення маси протікає паралельно з процесом зменшення маси. Деструктивні процеси виникають в наслідок дії мінусової температури на хімічно незв'язану воду, та кристалізації солі в зразках. Поки процеси утворення домінують над деструктивними, спостерігається приріст по масі навіть під час різного типу (локального чи об'ємного) дії від'ємних температур. Тому доцільно було проаналізувати зміну структури всередині, використовуючи методи визначення зміни водопоглинання та маси зразків протягом проходження циклів заморожування та відтавання.

Аналіз зміни маси і водопоглинання дозволяють оцінити стійкість матеріалу до циклічного заморожування та відтавання.

Проведені дослідження показали, що водопоглинання зразків з бетону зменшується зі збільшенням кількості циклів заморожування-відтавання. Зменшення W свідчить про новоутворення, в нашому випадку – це кристалізація солі в несучільностях.

В зразках-призмах О1 після 20 циклів заморожування-відтавання водопоглинання збільшилось на 34 %, а в зразках-кубах – зменшилось на 4% (табл. 5.3).

При однобічному впливі (О2) після 20 циклів замерзання та відтавання водопоглинання збільшилось на 20% (табл. 5.3).

Подальше збільшення кількості циклів заморожування-відтавання до 40 призводить до зниження водопоглинання в бетонних зразках-призмах при однобічному заморожуванні на 13% і при всебічному – на 1%. Водопоглинання зразків-кубів після 40 циклів заморожування збільшилось на 50% (рис. 5.4.б).

Таблиця 5.3

Порівняльний аналіз зміни коефіцієнтів пошкодженості і зміни водопоглинання зразків-призм в умовах заморожування та відтавання

Кількість циклів	Всебічний вплив		Локальний вплив	
	W, %	$K_{п}, \text{см/см}^2$	W, %	$K_{п}, \text{см/см}^2$
0	3,75	100	3,75	100
8	4,9	213	5	194
13	5	256	4,83	225
20	5	263	4,52	281
25	5,23	300	4,4	368
30	4,59	350	3,74	360
40	3,77	413	3,23	394

В зразках О2 після 20 циклів заморожування-відтавання маса зразків-призм збільшилась на 0,6%.

Подальше збільшення кількості циклів до 40 призводить до зниження маси в бетонних зразках-призмах при однобічному заморожуванні до 18% і при всебічному до 25,4% (рис. 5.5).

На рис. 5.6 показана залежність зміни коефіцієнта пошкодженості та водопоглинання в залежності від кількості циклів заморожування та відтавання для зразків-призм. В результаті аналізу спостерігається нелінійна зміна водопоглинання та коефіцієнта пошкодженості незалежно від виду впливу заморожування та відтавання.

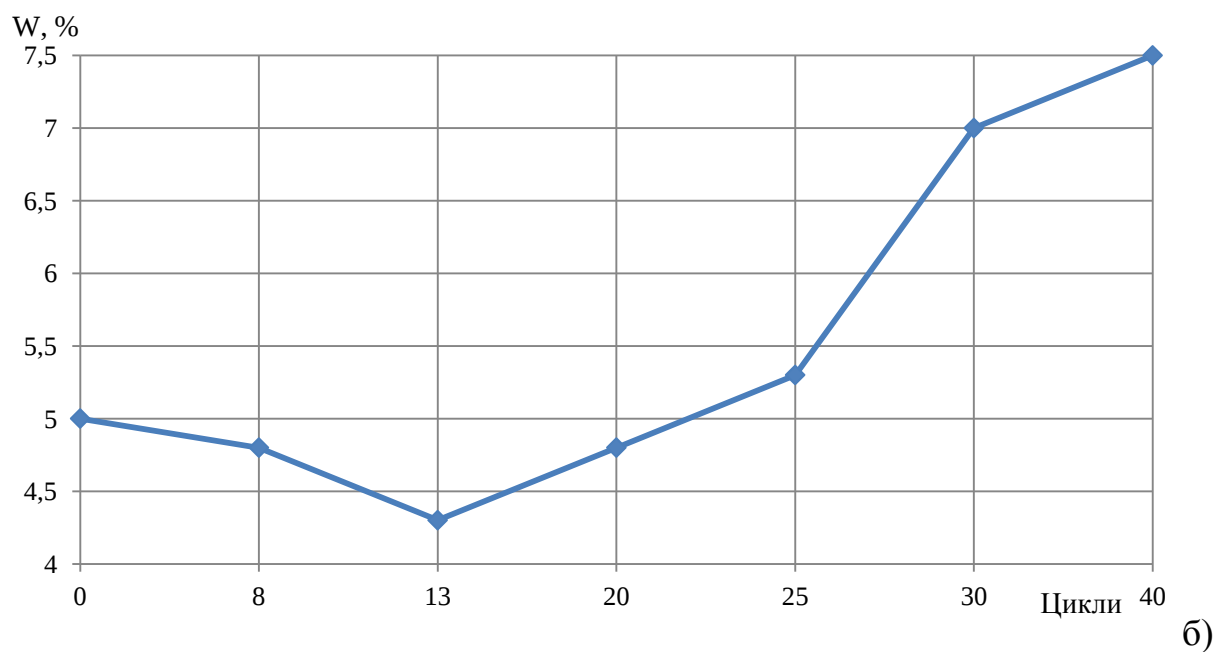
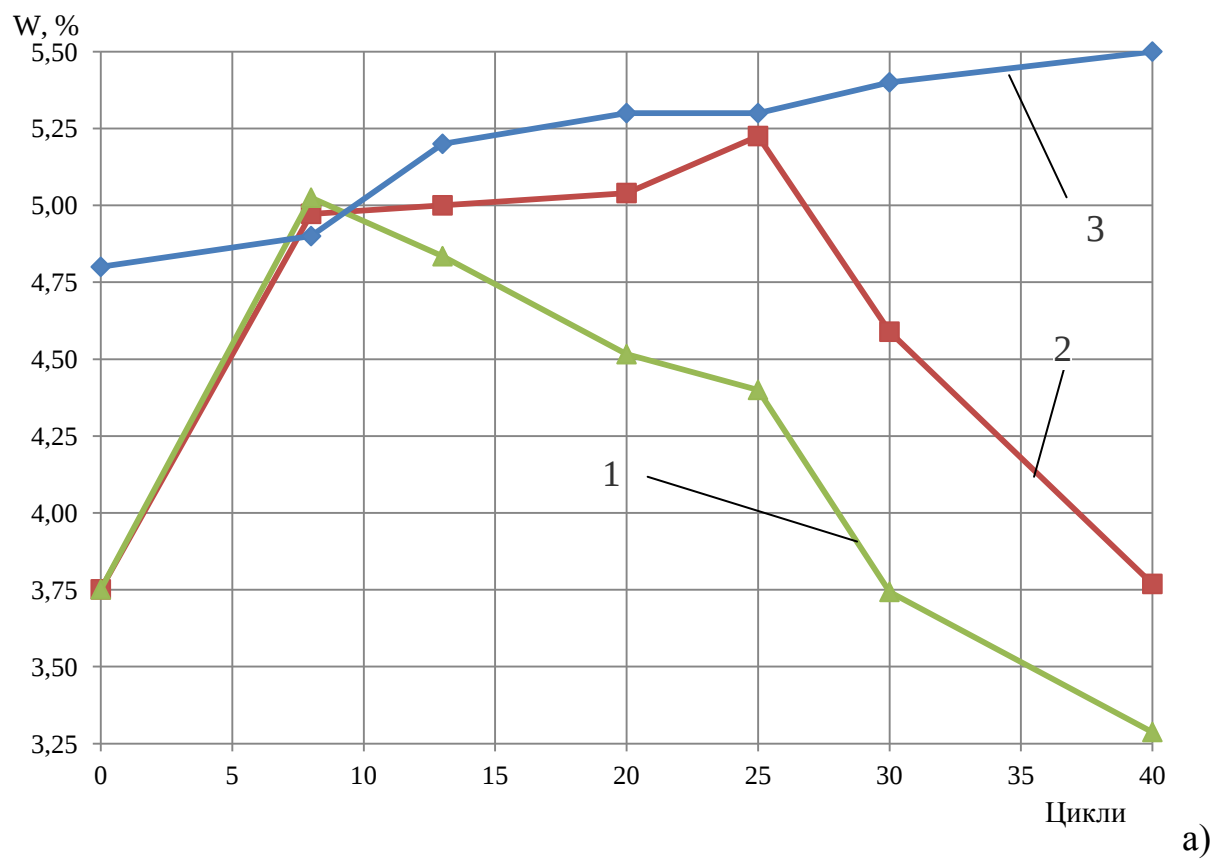
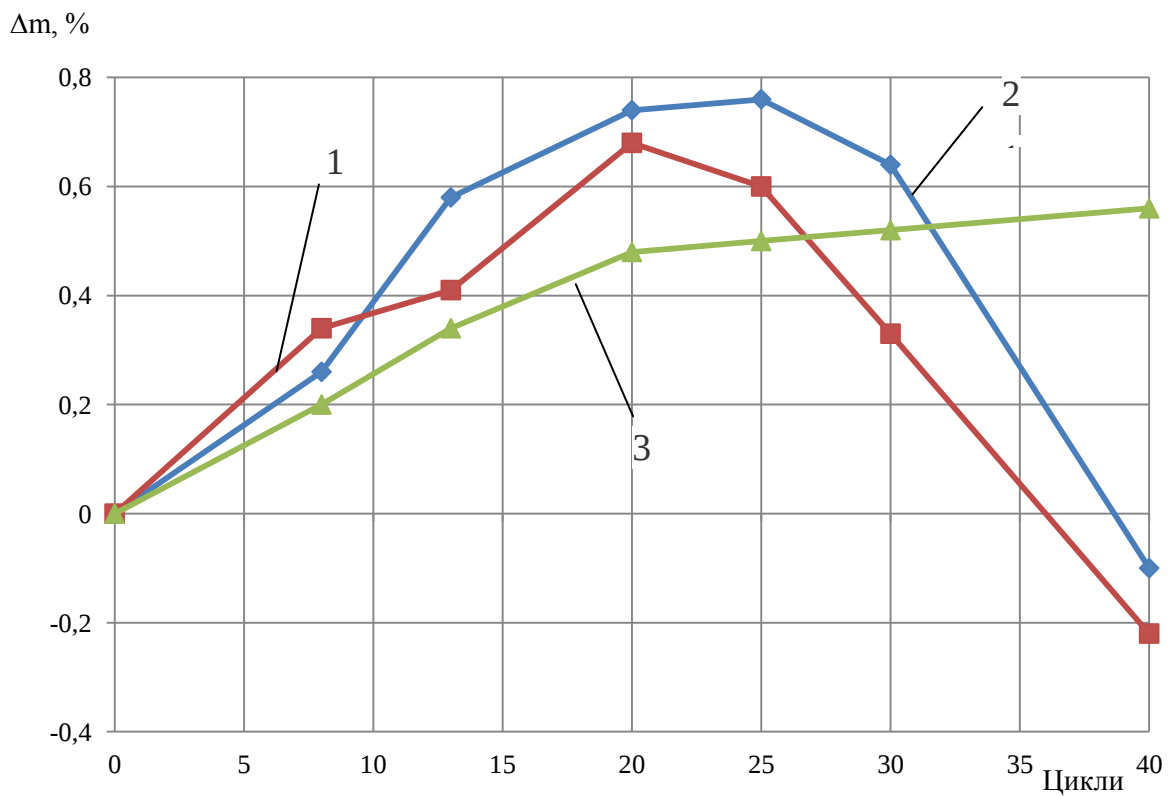
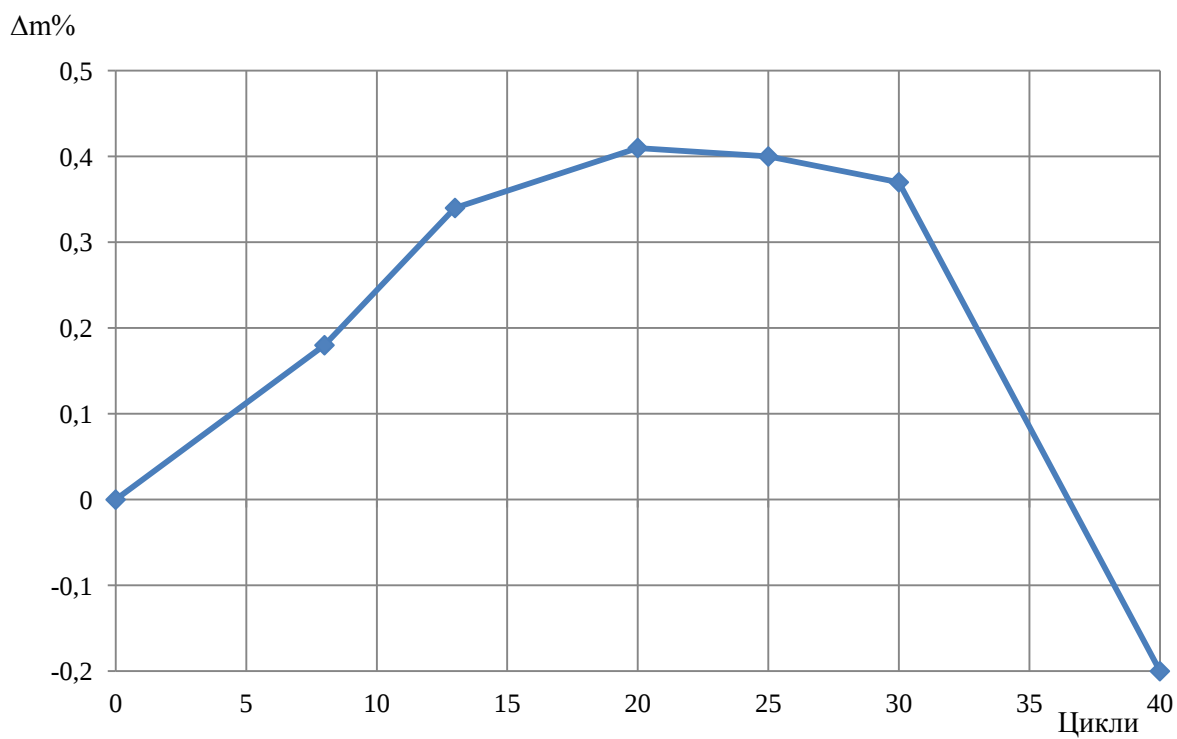


Рис. 5.4. Вплив умов заморожування на зміну водопоглинання (W , %): а) зразків-призм; б) зразків-кубів;

1 – при всебічному впливі; 2 – при однобічному впливі; 3 – контрольні зразки



а)



б)

Рис. 5.5. Вплив умов заморожування на зміну маси (Δm , %): а) зразків-призм; б) зразків-кубів;

1 – при всебічному впливі; 2 – при однобічному впливі; 3 – контрольні зразки

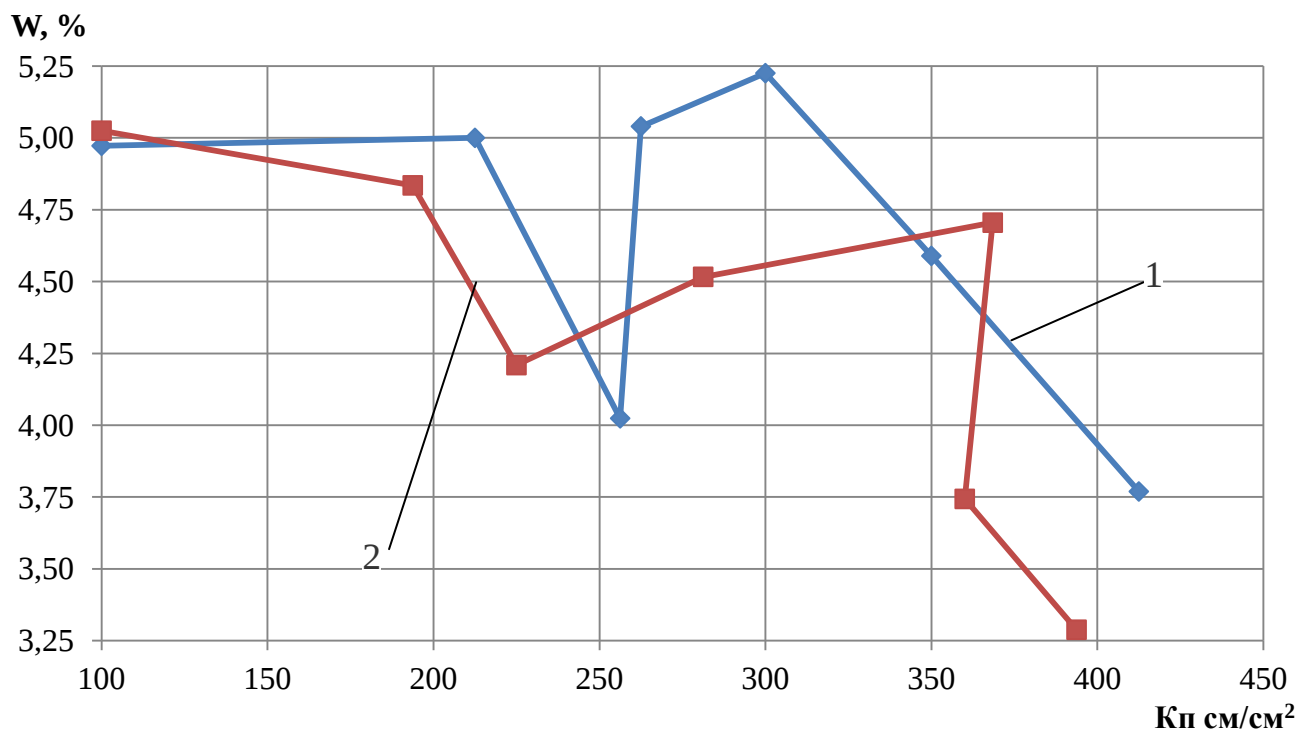


Рис. 5.6. Порівняльний аналіз зміни коефіцієнтів пошкодженості і зміни водопоглинання зразків в різних умовах заморожування та відтавання: 1 – при всебічному впливі; 2 – при однобічному впливі

Знакозмінні об'ємні деформації матеріалу, що виникають за рахунок періодичної зміни температури і тиску льоду, ведуть до зміни структури, що в свою чергу, змінює фізико-механічні властивості бетону, який знаходиться в зоні дії від'ємних температур.

Проведене дослідження дозволило зробити висновки, що завдяки фіксації зміни маси зразків можна побачити зміни в структурі зразків в залежності від кількості циклів заморожування-відтавання як в зразках О1, так і в зразках О2. Нелінійність в усіх графіках зміни маси свідчить про складну та нелінійну зміну структури бетону при проходженні циклів заморожування-відтавання.

Зміна водопоглинання зразків в залежності від умов проходження циклів заморожування-відтавання є свідченням зміни внутрішньої структури. Аналіз результатів показав, що зразки при однобічному та всебічному впливі ідентично змінювали показник W .

Виконана робота дала можливість оцінити вплив всебічного і однобічного заморожування зразків на зміну маси та водопоглинання бетону.

5.2.2. Вплив умов заморожування на зміну швидкості проходження ультразвуку в зразках

Аналіз зміни швидкості проходження ультразвуку дає змогу для додаткового спостереження та аналізування зміни структури при проходженні заморожування та відтавання. Зміна маси веде до зміни водопоглинання, зміна водопоглинання, в свою чергу, має відображатись в зміні швидкості проходження ультразвуку в зразку (V). Швидкість проходження ультразвуку свідчить про стан цілісності та щільності внутрішньої структури бетону.

Аналіз швидкості проходження ультразвуку в зразку дасть змогу говорити про структурні зміни: збільшення швидкості вказує на новоутворення в зразку, а зменшення – на утворення нових ВПР або тріщин.

Це обумовило задачу досліджень: виявити вплив змін умов заморожування зразків на зміну швидкості проходження ультразвуку в бетоні.

Оскільки мета та задачі дослідження стояли в визначенні впливу заморожування та відтавання в локальній ділянці зразка, то доцільно було фіксувати зміну швидкості проходження ультразвуку не тільки вздовж зразка (база $L=40\text{см}$), а і поперечно (база $a=10\text{см}$). Оцінку проводили на зразках-призмах розміром $10\times 10\times 40\text{см}$. Порівняння двох результатів з одного зразка дасть змогу більш детально вивчити вплив умов заморожування.

В зразках О1 в базі L після 20 циклів заморожування-відтавання швидкість проходження ультразвуку зменшилась на 7%, базі a – на 4% (рис. 5.7).

При однобічному впливі в базі L у зразках О2 після 20 циклів заморожування-відтавання швидкість проходження ультразвуку в зразках-призмах зменшилась на 5% (рис. 5.7).

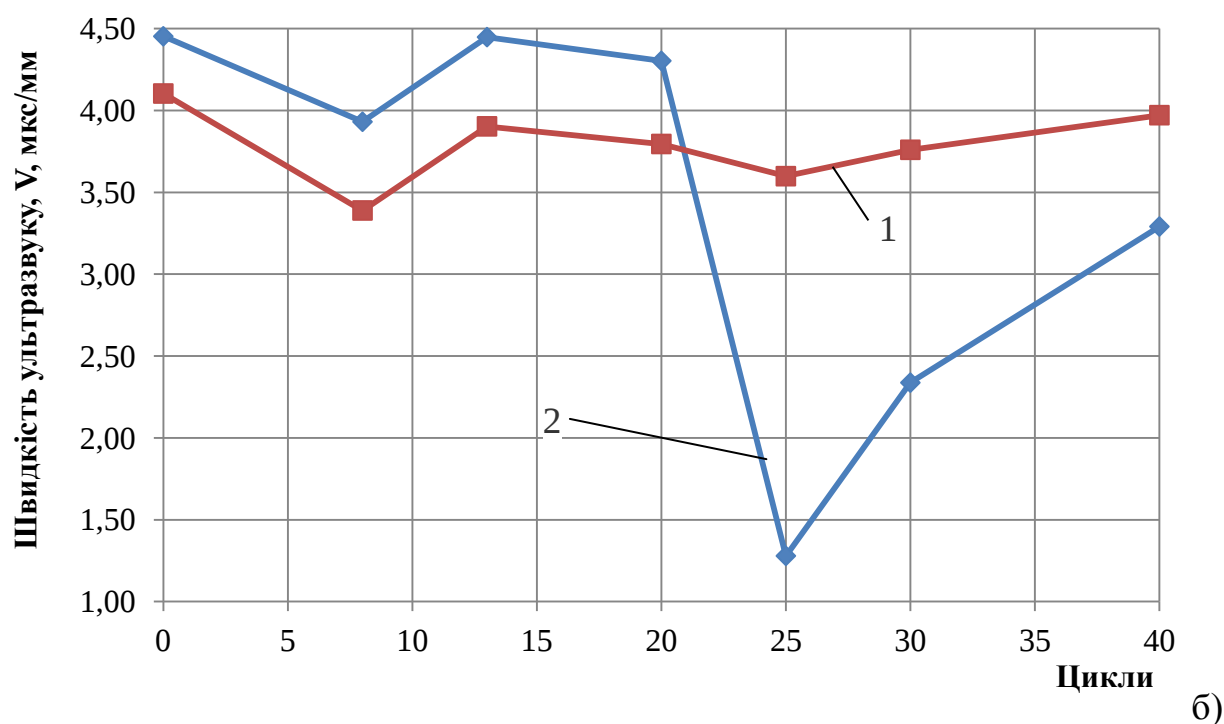
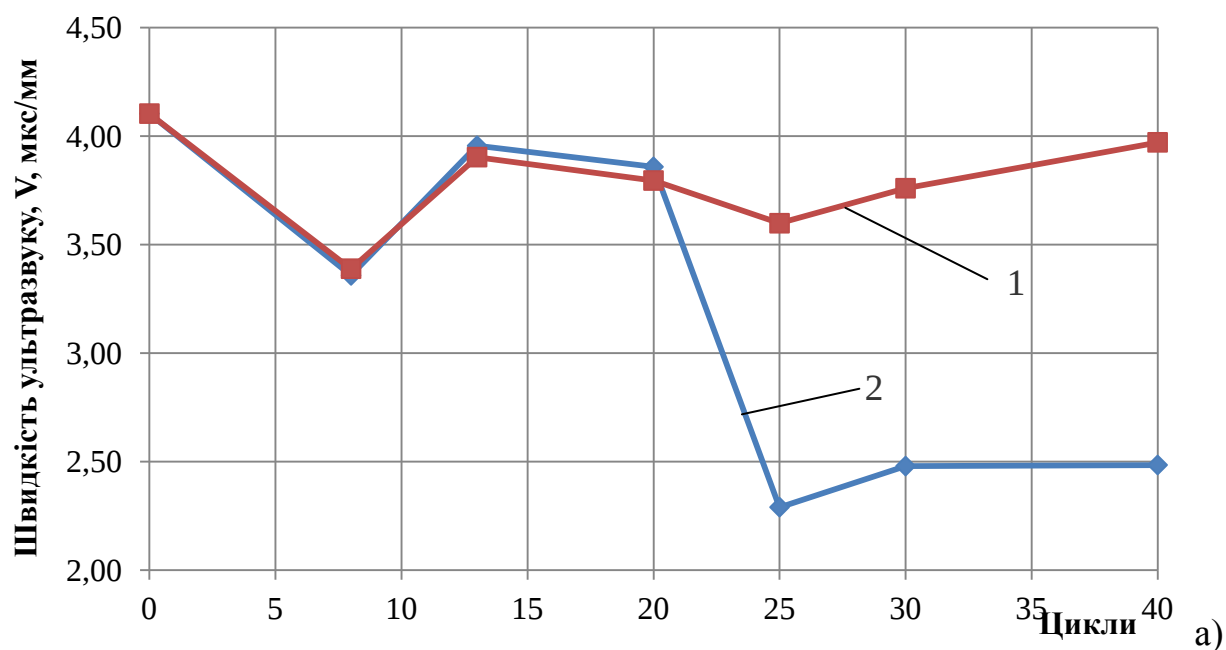


Рис. 5.7. Вплив умов заморожування на зміну швидкості проходження ультразвуку в зразках: а) поперечно (a); б) вздовж (L);

1 – зразки, що проходили заморожування всебічно; 2 – зразки, що проходили заморожування локально

При однобічному впливі в базі a у частині зразка $O2+$ після 20 циклів заморожування-відтавання V зменшилась на 4%. В базі a в частині зразка $O2-$

після 20 циклів заморожування-відтавання швидкість ультразвуку зменшилась на 11% (рис. 5.8.а).

В зразках-кубах, після 20 циклів заморожування-відтавання, швидкість проходження ультразвуку зменшилась на 18% (рис. 5.8.б).

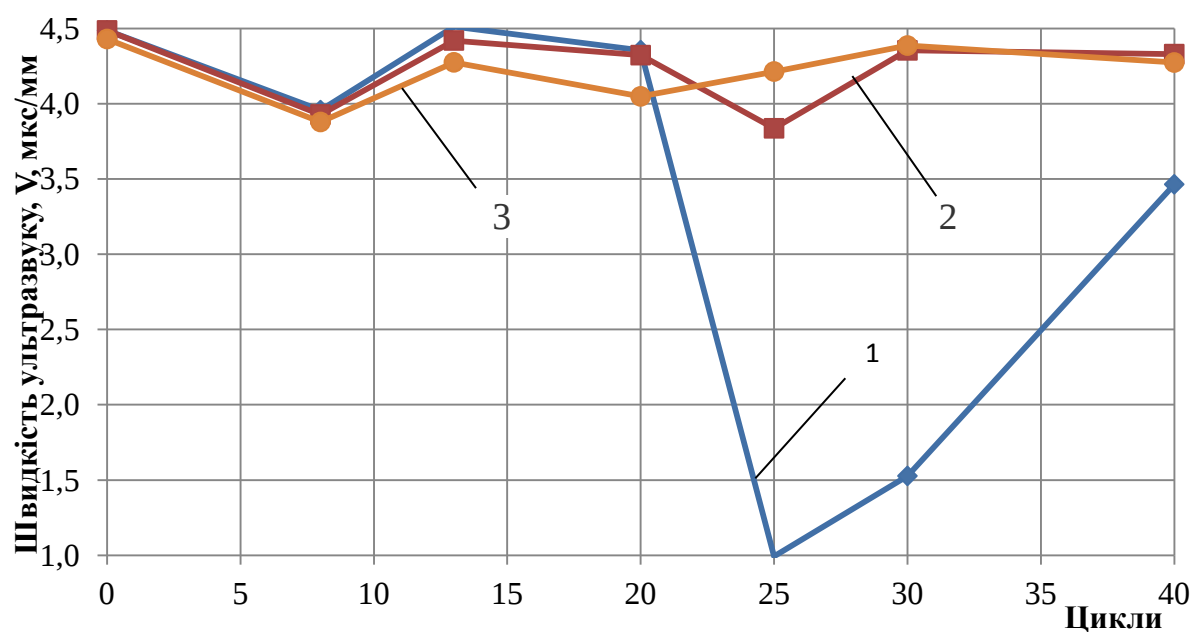
Подальше збільшення кількості циклів до 40 призводить до зниження швидкості проходження ультразвуку в зразках О1 в базі L для зразків-призм на 39%. В тих же зразках, але з базою a , швидкість ультразвуку зменшилась на 22,2% (рис. 5.7).

В зразках О2 з базою L після 40 циклів заморожування-відтавання V для зразків-призм зменшилась на 1%. Швидкість проходження ультразвуку в базі a , для половин О2+ та О2- збільшилась на 2% та 2,5% відповідно (рис. 5.8.а).

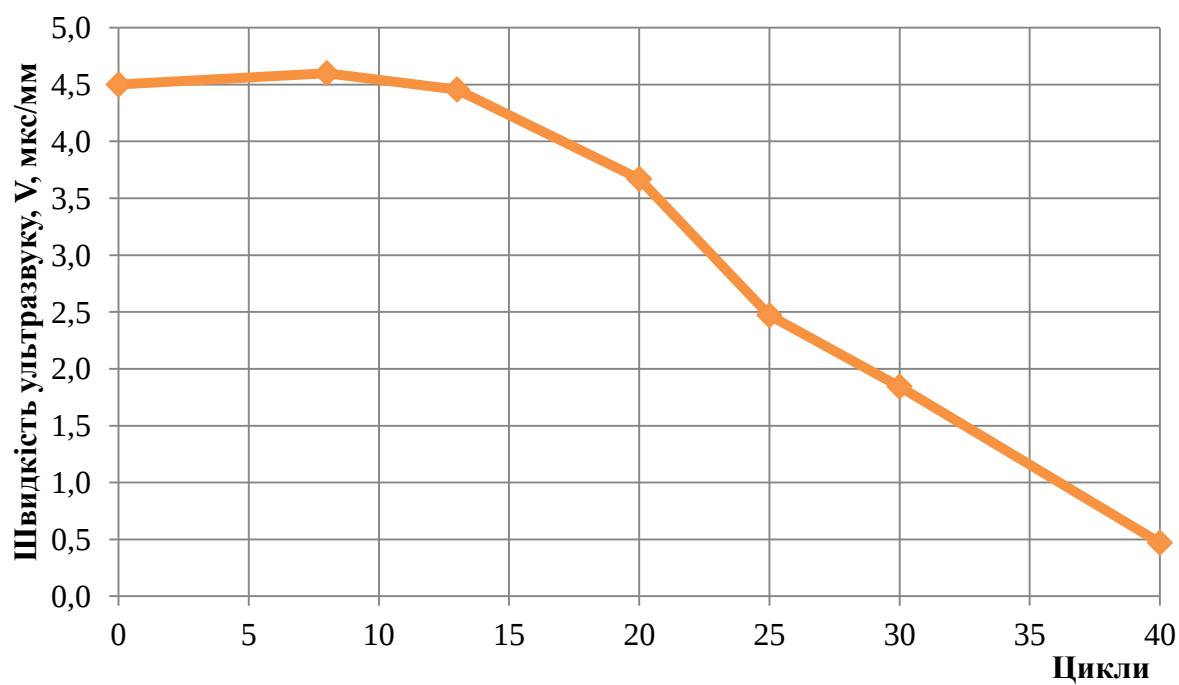
Швидкість проходження ультразвуку в зразках-кубах після 40 циклів заморожування-відтавання знизилась на 88,9% (рис. 5.8.б).

Порівняльний аналіз зміни коефіцієнтів пошкодженості і зміни швидкості проходження ультразвуку в зразках показав, що найбільш активний вплив циклічного заморожування-відтавання на зміну швидкості проходження ультразвуку та зміну K_n при всебічному впливі спостерігався між 30 та 40 циклами, при локальному – між 13 та 20 циклами (рис. 5.9, табл. 5.4).

Експериментальні дослідження показали, що зі збільшенням кількості циклів заморожування та відтавання швидкість проходження ультразвуку в зразках зменшується. Зменшення показника V нелінійно, це свідчить про наявність кристалів солі всередині зразка та їх ріст.



а)



б)

Рис. 5.8. Вплив умов заморожування на зміну швидкості проходження ультразвуку в базі *a* в: а) зразках-призмах; б) зразках-кубах;

1 – зразки, що проходили заморожування всебічно; 2 – половина зразка, що не проходила заморожування; 3 – половина зразка, що проходила заморожування

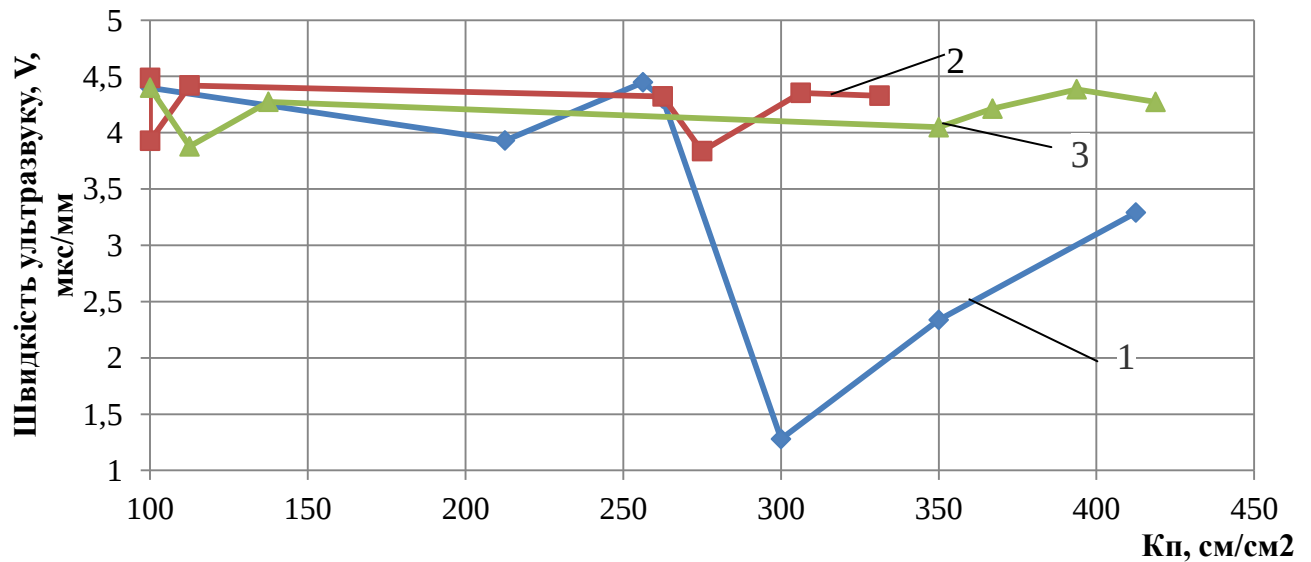


Рис. 5.9. Порівняльний аналіз зміни коефіцієнтів пошкодженості і зміни швидкості проходження ультразвуку в різних умовах заморожування та відтавання: 1 – зразки, що проходили заморожування всебічно; 2 – половина зразка, що не проходила заморожування; 3 – половина зразка, що проходила заморожування

Таблиця 5.4

Порівняльний аналіз зміни коефіцієнтів пошкодженості і зміни швидкості проходження ультразвуку в зразках в різних умовах заморожування та відтавання

Кількість циклів	Всебічний вплив		Локальний вплив O2+		Локальний вплив O2-	
	Кп, см/см ²	V, мкс/мм	Кп, см/см ²	V, мкс/мм	Кп, см/см ²	V, мкс/мм
0	100	4,4	100	4,49	100	4,4
8	213	3,9	100	3,93	113	3,9
13	256	4,4	113	4,42	138	4,3
20	263	4,3	263	4,32	350	4,0
25	300	1,3	275	3,84	367	4,2
30	350	2,3	306	4,35	394	4,4
40	413	3,3	331	4,33	419	4,3

В зразках відбуваються структурні зміни, які впливають на швидкість проходження ультразвуку в залежності від кількості циклів заморожування-відтавання як в зразках О1, так і в зразках О2.

5.2.3 Вплив однобічного заморожування-відтавання на міцність, що визначалась неруйнівним методом

В сучасних умовах будівництва неруйнівні методи контролю міцності бетону вважаються найбільш зручними. Випробування зразка імпульсним приладом ІПС-МК-03 дає змогу фіксувати зміну міцності поверхні зразка при проходженні циклів заморожування та відтавання.

Як правило, руйнування зразків як при всебічному, так і локальному заморожуванні і відтаванні, проходить від поверхневих до глибинних шарів матеріалу.

Виходячи з вищевикладеного, доцільно та актуально оцінити зміну міцності бетону при проходженні циклів різних типів заморожування та відтавання неруйнівним методом.

При використанні приладу ІПС-МК-03 протягом всіх циклів фіксувались показники міцності поверхні зразків-призм і зразків-кубів. Зміна характеристик протягом всього експерименту дає можливість зафіксувати зміну міцності бетону після певної кількості циклів заморожування-відтавання.

В зразках О1 після 20 циклів заморожування-відтавання міцність зменшилась на 15%. При однобічному впливі в зразках О2+ після 20 циклів заморожування-відтавання цей показник зменшився на 9,6%, в зразках О2- – на 14% (рис. 5.10.а). В зразках-кубах після 20 циклів заморожування-відтавання міцність зменшилась на 36% (5.10.б).

Результати експерименту показали, що в зразках, які проходили заморожування та відтавання всебічно, міцність зменшилась на 61%. У зразках, що проходили однобічне заморожування, в частині, що піддавалась від'ємним

температурам, міцність зменшилась на 48%, а в частині, що знаходилась в плюсовій температурі – на 56,5% (5.10.а).

В зразках-кубах після 40 циклів заморожування-відтавання міцність зменшилась на 70,8% (рис. 5.10.б).

Результати експерименту дали змогу оцінити вплив різного типу заморожування-відтавання та кількості циклів на зміну міцності бетону, що визначалась неруйнівним методом. При зміні виду впливу заморожування-відтавання різниця між об'ємним та локальним заморожуванням склала всього 34%. В той час як різниця між показниками міцності частини зразка, що проходила заморожування, та частини зразка, що знаходилась в плюсовій зоні температур, склала 18% (рис. 5.11, табл. 5.5).

Зміна міцності бетону, що визначалась неруйнівним методом, є відображенням структурних перетворень, що проходять зі зразком при проходженні циклів заморожування та відтавання. За отриманими результатами можна зробити висновок, що зміна виду впливу заморожування-відтавання змінює й інтенсивність перетворень.

В зразках, що проходили локальне заморожування та відтавання, результат показав, що половина зразка, яка не піддавалась дії від'ємної температури, також змінює свої показники.

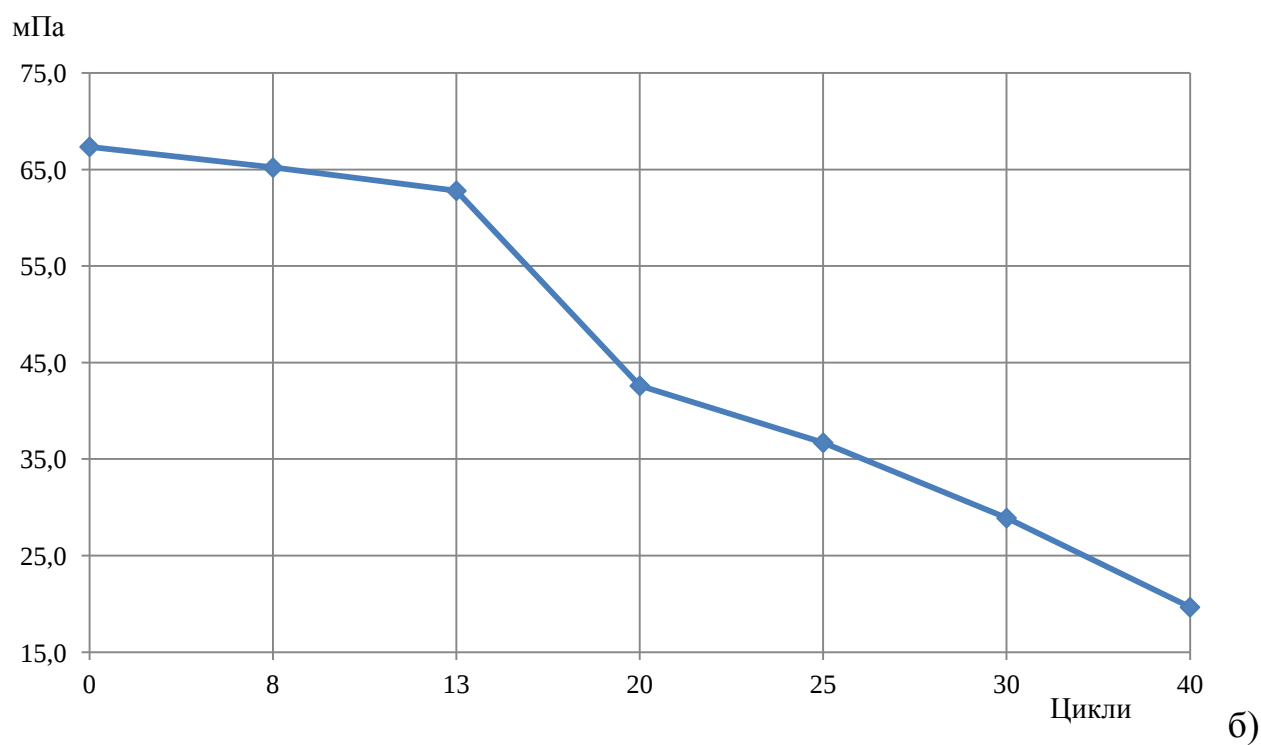
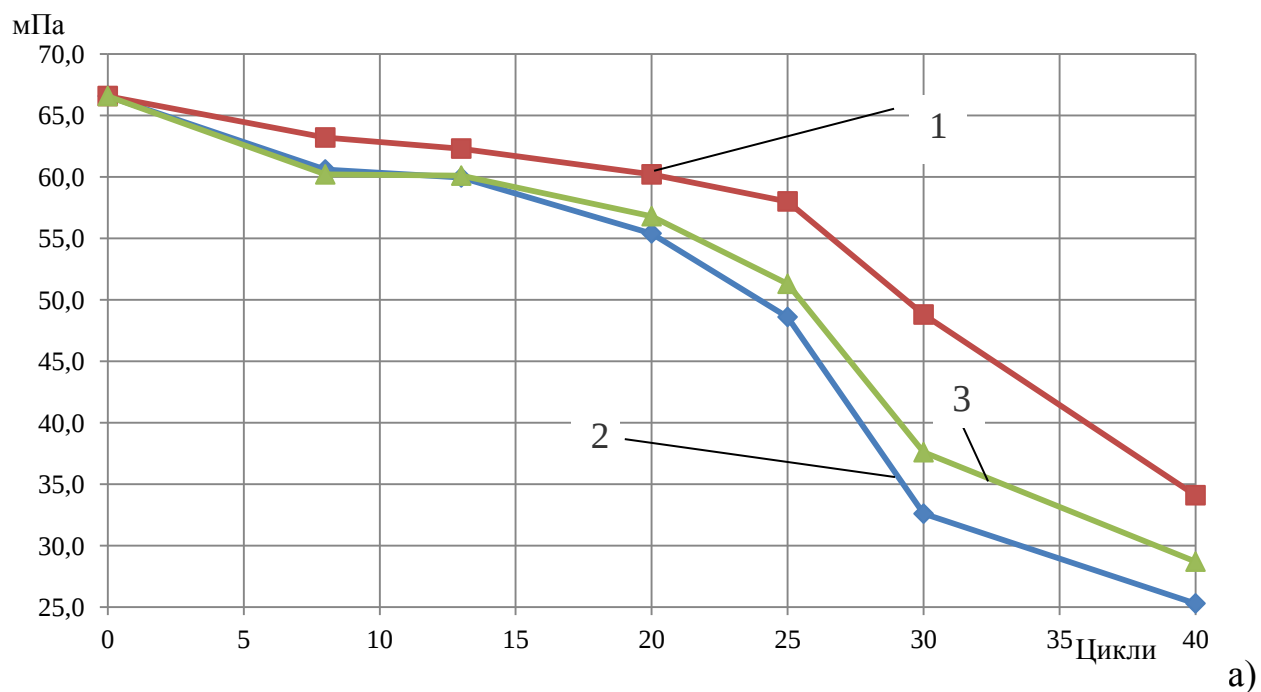


Рис.5.10. Вплив умов заморожування на зміну міцності: а) зразків-призм; б) зразків-кубів: 1 – половина зразка, що не проходила заморожування; 2 – зразки, що проходили заморожування всебічно; 3 – половина зразка, що проходила заморожування

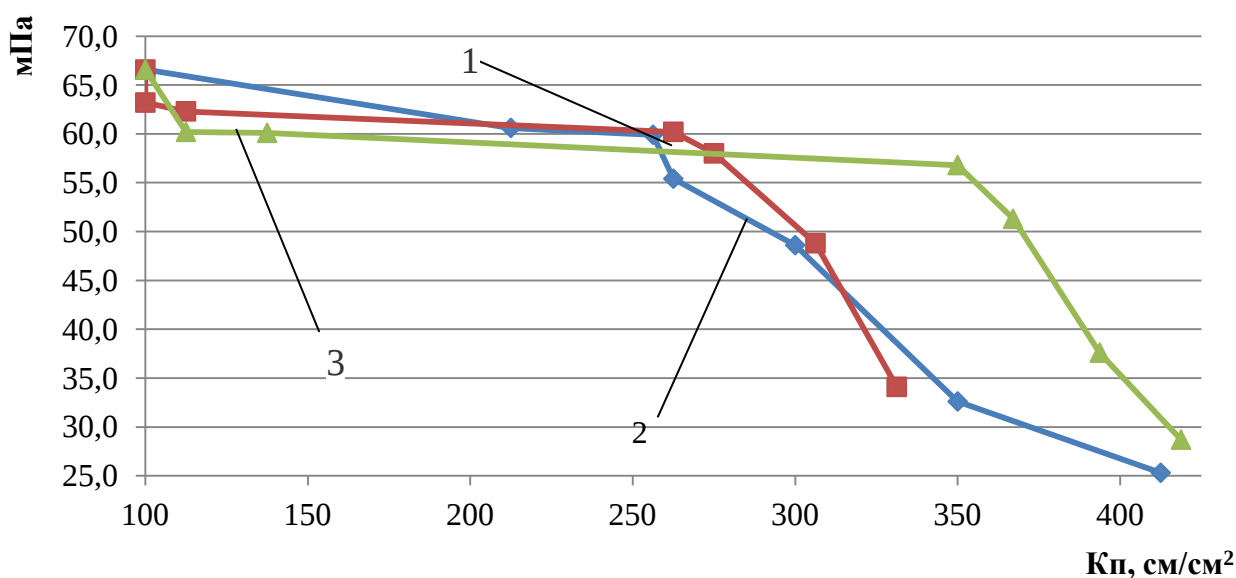


Рис. 5.11. Порівняльний аналіз зміни коефіцієнтів пошкодженості і зміни міцності зразків в умовах заморожування та відтавання: 1 – зразки, що проходили заморожування всебічно; 2 – половина зразка, що не проходила заморожування; 3 – половина зразка, що проходила заморожування

Таблиця 5.5

Порівняльний аналіз зміни коефіцієнтів пошкодженості і зміни поверхневої міцності зразків в різних умовах заморожування та відтавання

Кількість циклів	Всебічний вплив		Локальний вплив O2+		Локальний вплив O2-	
	Кп, см/см²	МПа	Кп, см/см²	МПа	Кп, см/см²	МПа
0	100	66,6	100	66,6	100	66,6
8	213	60,6	100	63,2	113	60,2
15	256	59,9	113	62,3	138	60,1
20	263	55,4	263	60,2	350	56,8
25	300	48,6	275	58	367	51,3
30	350	32,6	306	48,8	394	37,6
40	413	25,3	331	34,1	419	28,7

Отримані результати аналізу внутрішніх та зовнішніх змін структури дають змогу говорити, що частина зразка, яка знаходиться в плюсовій зоні, схильна до морозної деструкції, але менш інтенсивно. Тобто O2+ виступає в ролі демпфера, який дає змогу витримувати більшу кількість циклів заморожування та відтавання O2-. Відповідно, порівнюючи всебічний вплив заморожування-відтавання та однобічний, зразки O2 більш стійкі до морозної деструкції.

5.3. Зміна механічних характеристик та стійкість бетону

Міцність зразків визначалась згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009 "Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками".

Характеристики міцності є одними з найважливіших в КБМ, оскільки вони є прямим відображенням структурних змін, що відбуваються в зразку.

Після 20 циклів заморожування-відтавання міцність на розтяг при згині ($f_{c.tf}$) в зразках-призмах, що проходили заморожування локально, знизилася на 15%, в зразках, що проходили заморожування всебічно, – на 25%. Міцність на розтяг при розколюванні ($f_{c.m}$) в зразках з всебічним впливом заморожування-відтавання зменшилась на 51%, в зразках з локальним типом впливу для половини зразка, що не проходила заморожування, – на 32%, для половини зразка, що проходила заморожування, – на 45%. Міцність на стиск ($f_{c.cube}$) в зразках, що проходили заморожування всебічно, зменшилась на 29%, в зразках, що проходили заморожування локально, в половині зразка, яка проходила заморожування, – на 24%, в половині зразка, яка не проходила заморожування, – на 20%.

Зразки-призми при всебічному типі впливу заморожування-відтавання після проходження 40 циклів змінили свої характеристики міцності: міцність на розтяг при згині (f_{ctf}) зменшилась на 49%, міцність на розтяг при розколюванні (f_{ctm}) зменшилась на 78%, міцність на стиск (f_{ctk}) зменшилась на 26% (рис.5.12.).

При однобічному впливі після 40 циклів заморожування-відтавання міцність при згині зразків-призм (f_{ctk}) зменшилась на 20% (рис.5.12.а).

Міцність на розтяг при розколюванні (f_{ctn}) в частинах зразків, що не проходили заморожування та відтавання (O2+) на 40 циклі знизилась на 71%, в частинах, що проходили заморожування та відтавання (O2-) – на 78% (рис.5.12.б).

Після 40 циклів заморожування-відтавання міцність на стиск (f_{ctf}) в частинах зразків, що не проходили заморожування та відтавання (O2+) зменшилась на 15%, в частинах, що проходили заморожування та відтавання (O2-) – на 31,2% (табл. 5.6., рис.5.12.в).

Міцність на стиск зразків-кубів після 40 циклів заморожування-відтавання зменшилась на 44,6% (рис.5.13).

Таблиця 5.6

Характеристики міцності бетону після проходження 40 циклів заморожування-відтавання

Вид мех. характеристик Вид впливу	На розтяг при згині, f_{ctf} , МПа	На розтяг при розко- люванні (f_{ctn})	На стиск, f_{ctk} , МПа
Всебічний вплив (O1)	2,6	0.19	29
Локальний вплив (O2+)	4,1	0.26	33,6
Локальний вплив (O2-)		0.19	27,1
Контрольні зразки	5,1	0.88	39,4

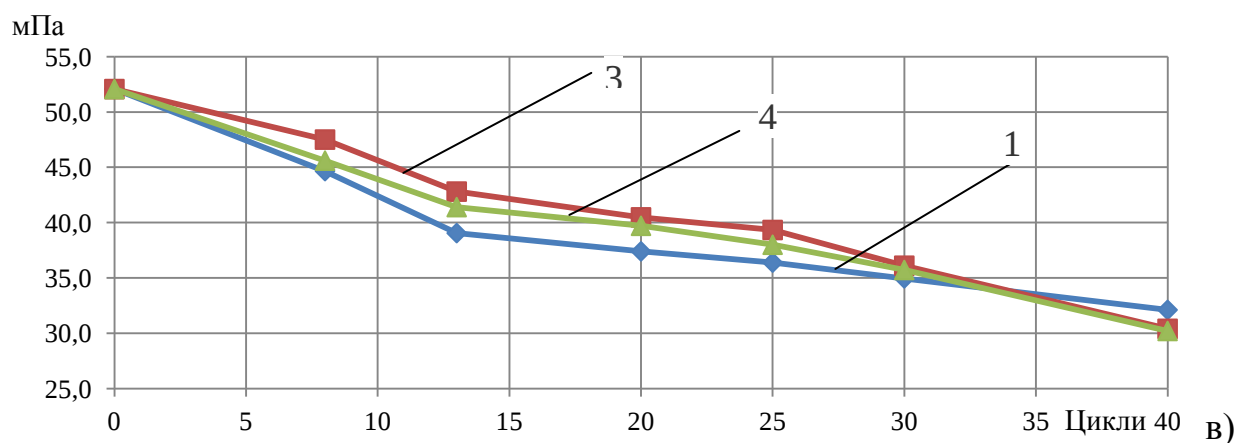
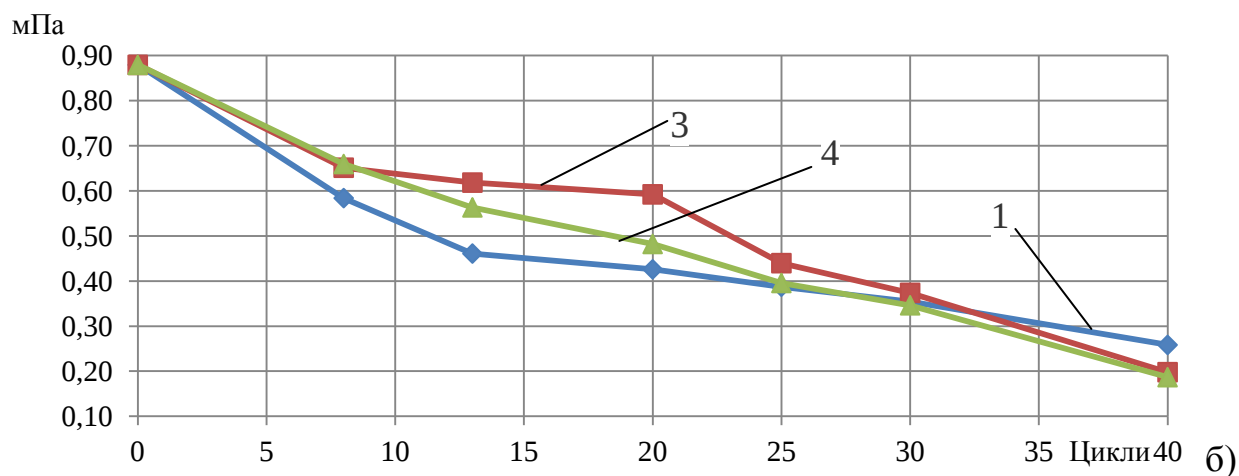
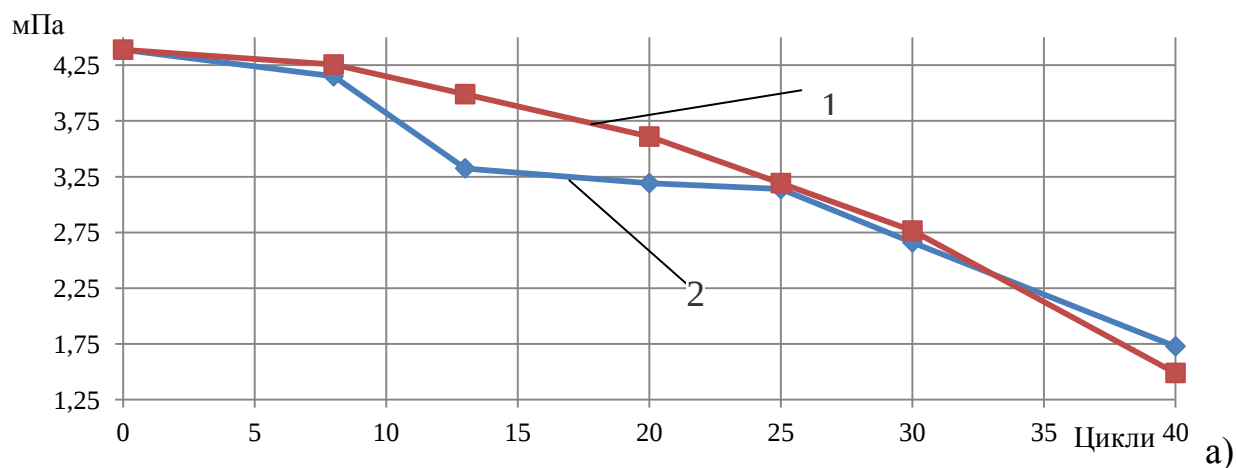


Рис. 5.12. Вплив умов заморожування на зміну міцності: а) на розтяг при згині; б) на розтяг при розколюванні; в) на стиск;

1 – зразки, що проходили заморожування всебічно; 2 – зразки, що проходили заморожування локально; 3 – половина зразка, що не проходила заморожування; 4 – половина зразка, що проходила заморожування

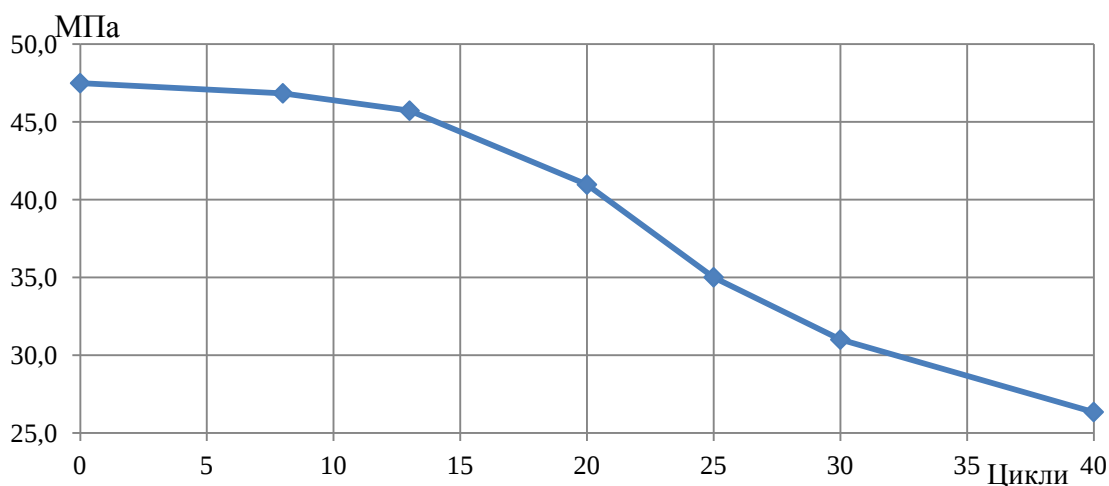


Рис. 5.13. Вплив умов заморожування на зміну міцності на стиск в зразках-кубах

Після 20 циклів заморожування-відтавання коефіцієнт стійкості на розтяг при згині в зразках-призмах при локальному впливі знизився на 30%, в зразках при всебічному впливі – на 20% (рис. 5.14.а). Коефіцієнт стійкості на розтяг при розколюванні в зразках при всебічному впливі зменшився на 50%. В зразках з локальним типом впливу для половини зразка, що не проходила заморожування, коефіцієнт стійкості зменшився на 30%, а для половини зразка, що проходила заморожування, – 45% (рис. 5.14.б). Коефіцієнт стійкості на стиск зразків при всебічному впливі зменшився на 28%, в зразках при локальному впливі, в половині зразка, яка піддавалась заморожуванню – на 25%, в половині зразка, яка не піддавалась заморожуванню, – на 19% (рис. 5.14.в).

Після 40 циклів заморожування-відтавання коефіцієнт стійкості на розтяг при згині в зразках-призмах при локальному впливі знизився на 60%, в зразках при всебічному впливі – на 62% (рис. 5.14.а). Коефіцієнт стійкості на розтяг при розколюванні в зразках-призмах при всебічному впливі зменшився на 70%, в зразках з локальним типом впливу для половини зразка, що не проходила заморожування, – на 80%, для половини зразка, що проходила заморожування, – на 80% (рис. 5.14.б). Коефіцієнт стійкості на стиск зразків при всебічному впливі зменшився на 32%, в зразках при локальному впливі, в половині зразка, яка проходила заморожування, – на 38%, в половині зразка, яка не проходила заморожування, – на 39% (рис. 5.14, табл.5.7).

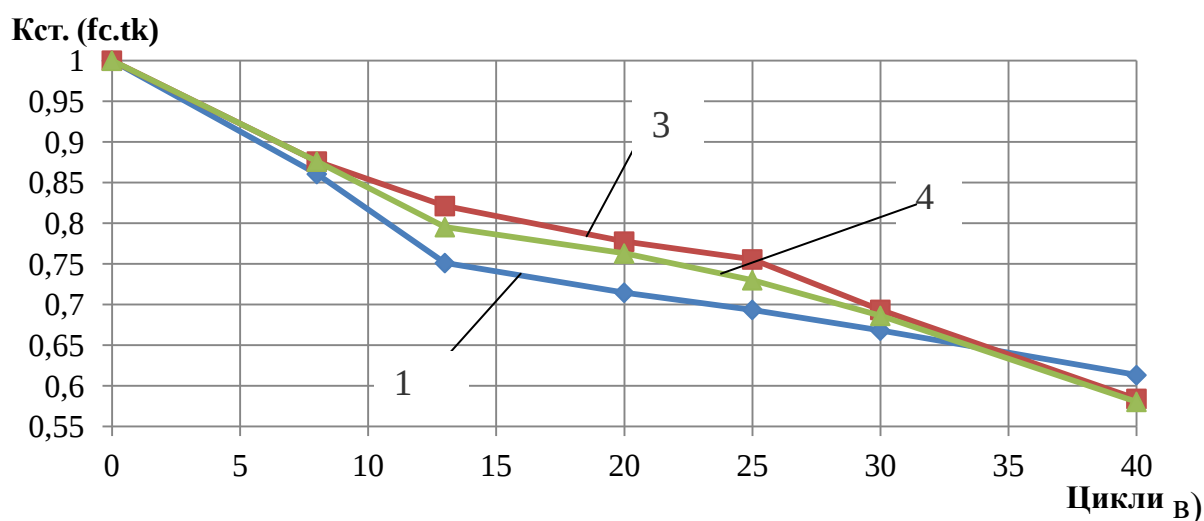
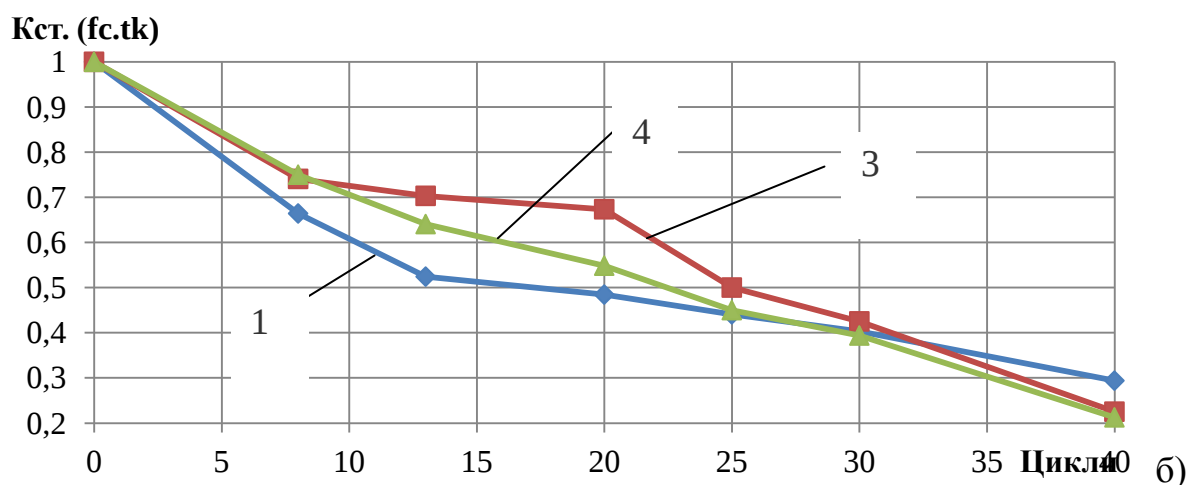
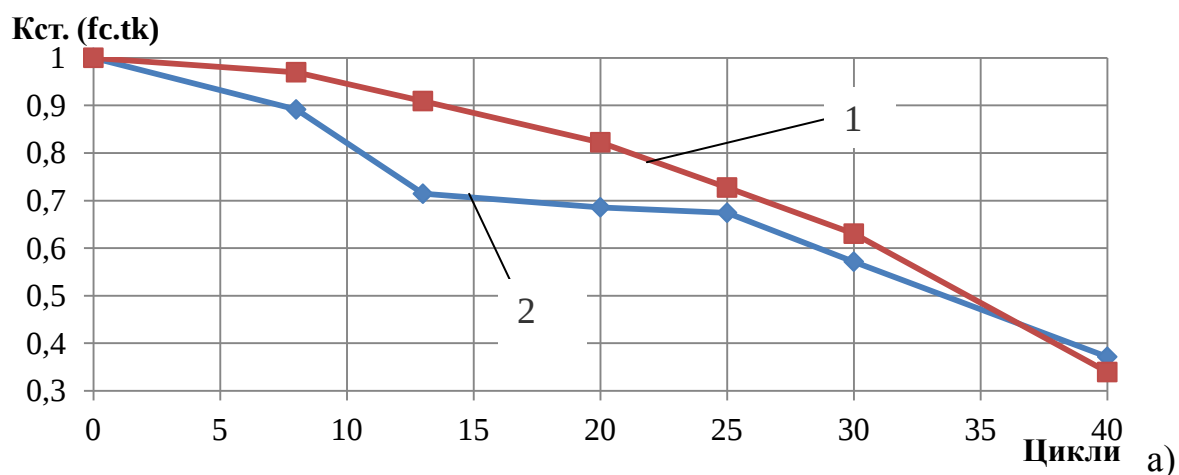


Рис. 5.14. Вплив умов заморожування на зміну коефіцієнта стійкості: а) на розтяг при згині; б) на розтяг при розколюванні; в) на стиск; 1 – зразки, що проходили заморожування всебічно; 2 – зразки, що проходили заморожування локально; 3 – половина зразка, що не проходила заморожування; 4 – половина зразка, що проходила заморожування

Таблиця 5.7

Коефіцієнт стійкості бетону після проходження 40 циклів заморожування-відтавання

Вид мех. характеристик Вид впливу	На розтяг при згині	На розтяг при розколюванні	На стиск
Всебічний вплив (O1)	0.37	0.29	0.61
Локальний вплив (O2+)	0.3	0.23	0.58
Локальний вплив (O2-)		0.2	0.58
Контрольні зразки	0.96	0.98	0.96

Аналіз результатів досліджень показав, що при проходженні циклів заморожування-відтавання в зразках з бетону відбуваються структурні зміни, про що свідчить зміна коефіцієнта пошкодженості, міцності, що визначалась неруйнівним методом, і швидкості проходження ультразвуку. В свою чергу, структурні зміни викликають зміни в водопоглинанні та масі зразків. Комплекс всіх цих змін веде до зміни міцності на розтяг при згині, міцності на розтяг при розколюванні і міцності на стиск [101, 102, 106, 109, 161].

Результати проведених експериментів дали можливість наочно побачити, що при різних типах впливу від'ємних температур зміна стійкості відбувається неоднаково.

Виконана робота дала можливість оцінити вплив всебічного і однобічного заморожування-відтавання зразків з бетону на зміну його фізико-механічних характеристик.

Висновки за 5-м розділом

1. На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що коефіцієнт пошкодженості зразків при локальному впливі заморожування-відтавання після 40 циклів менший ніж при всебічному впливі.

2. Проведене дослідження дозволило зробити висновки, що зміна маси зразків свідчить про зміни в структурі зразків, розмір яких залежить від кількості циклів заморожування-відтавання, як в зразках О1, так і в зразках О2. Нелінійність в усіх графіках зміни маси зразків свідчить про складну та нелінійну зміну структури бетону при проходженні циклів заморожування-відтавання.

Зміна водопоглинання зразків в залежності від умов проходження циклів заморожування-відтавання також є свідченням зміни внутрішньої структури матеріалу. Зразки при однобічному та всебічному впливі ідентично змінювали показник W , що підтверджується результатами зміни швидкості проходження ультразвуку та міцності, що визначалась неруйнівним методом.

3. Проведені дослідження дали можливість оцінити вплив всебічного і однобічного заморожування-відтаювання зразків на стійкість бетону. Результати експерименту дають підставу зробити висновок, що умови впливу від'ємних температур на вироби і конструкції грають істотну роль в їх здатності чинити опір морозному руйнуванню. Можна припустити, що при однобічному заморожуванні в зразках створюються більш сприятливі умови, здатні релаксувати частину небезпечних деформацій, які виникають при замерзанні води в поровому об'ємі матеріалу.

4. Результати досліджень, що викладені у даному розділі, опубліковані у роботах [70, 101, 102, 106, 109, 161].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведені дослідження показали, що в залежності від умов заморожування змінюються структура та властивості цементного каменю, розчину та бетону, що веде до зміни їх морозостійкості. Вплив умов заморожування на морозостійкість матеріалу необхідно враховувати в залежності від умов експлуатації будівель та споруд.

2. Аналіз умов експлуатації більшості будівельних виробів та конструкцій (огорожувальні конструкції будівель і споруд різного значення, греблі, облицювання каналів, напірні і безнапірні труби, ЛЕП тощо) показав, що, як правило, зовнішні погодні впливи діють на них однобічно або локально. Проведений аналіз основних причин зниження морозостійкості показав, що практично відсутня науково-технічна інформація щодо впливу умов заморожування виробів (зразків) на морозостійкість будівельних матеріалів.

3. Проведений аналіз розвитку об'ємних деформацій показав, що в залежності від умов заморожування та відтавання виникає індивідуальний характер розподілу деформацій. Аналіз дозволив встановити, що при однобічному заморожуванні зменшується відносна величина переміщень та зменшуються градієнти по напрямку переміщень в порівнянні з об'ємним заморожуванням. Таким чином зменшення інтегральних деформацій збільшує здатність матеріалу протистояти морозному руйнуванню.

4. Зміна умов заморожування зразків із цементного каменю призвела до зміни коефіцієнта пошкодженості, після 20 циклів заморожування-відтавання коефіцієнт пошкодженості зразків при всебічному заморожуванні збільшився в 2,5 рази порівняно з K_n зразків, які сприймали одностороннє заморожування.

Міцність на розтяг при згині та міцність на стиск в зразках, що проходили заморожування всебічно, зменшились на 54% та 43% відповідно. Зразки, що проходили заморожування локально, зменшили показники міцності на розтяг при згині ($f_{c.tf}$) та міцності на стиск ($f_{c.cube}$) на 44% та 27% відповідно.

5. Морозостійкість розчину в залежності від умов заморожування зразків свідчить про їх вплив на зміну фізико-механічних властивостей.

Коефіцієнт пошкодженості для зразків, що проходили заморожування всебічно, збільшився в 9 раз. Для зразків, що проходили заморожування локально, K_n збільшився в 5,5 разів.

Міцність на розтяг при згині та міцність на стиск зразків, що проходили заморожування всебічно, після 40 циклів зменшились на 50% та 43% відповідно. В зразках, що проходили заморожування локально, показники міцності на розтяг при згині ($f_{c.tf}$) та міцності на стиск ($f_{c.cube}$) зменшились на 21% та 15% відповідно.

6. Проведені дослідження морозостійкості бетону в залежності від умов заморожування показали, що після 20 циклів всебічного заморожування-відтавання міцність на розтяг при згині знизилась на 25%. При цьому пошкодженість бетону збільшилась в 2,5 рази. Міцність на розтяг при згині зразків в умовах одnobічного заморожування зменшилась на 15%. В умовах об'ємного заморожування міцність на стиск зменшилась на 29%. При одnobічному багаторазовому заморожуванні-відтаванні міцність на стиск зменшилась на 24%.

Проведені дослідження показали, що зміна фізико-механічних характеристик і морозостійкості будівельних матеріалів залежить від умов впливу від'ємних температур. Отримані результати експериментів дають підставу зробити висновок, що умови впливу від'ємних температур на вироби і конструкції грають істотну роль на їх здатність чинити опір морозному руйнуванню.

7. Аналіз отриманих результатів показав необхідність розробки рекомендацій з оцінки морозостійкості будівельних матеріалів в залежності від умов експлуатації об'єктів для яких вони призначені. Врахування виявлених залежностей в діючих нормативних документах дасть змогу більш диференційовано назначати вимоги з морозостійкості матеріалів, що неминуче призведе до зниження матеріалоємності виробів при одночасному підвищенні рівня безпечного функціонування. В цьому, на наш погляд, полягає практичне значення виконаних досліджень, що підтверджує акт про впровадження. Крім

того, використання окремих розділів досліджень в навчальному процесі в циклах лекцій та практичних роботах з дисциплін, пов'язаних з технологією, структуроутворенням та експлуатацією будівельних матеріалів та виробів, більш широко розкриває взаємозв'язок між матеріалами та виробами, дає змогу розширити варіативність при прийнятті раціональних рецептурно-технологічних рішень. В сукупності це призводить до підвищення та поглиблення знань учасників навчального процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абдрахимов В. З. Взаимосвязь пористо-капиллярной структуры и морозостойкости керамического материала. *Материаловедение*. 2005. № 6. С. 19–23.
2. Абдрахимова Е. С. Изменение линейных размеров образцов из различных глинистых материалов при испытании на морозостойкость. *Известия вузов. Строительство*. 2004. № 8. С. 62–65.
3. Агаджанов В. И. Экономика повышения долговечности и коррозионной стойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1998. 144 с.
4. Айзинсон И. Л., Шуршалина Е. Н., Трофимичева Л. З. Ударопрочные, морозостойкие и эластичные композиции на основе полиамида-6 и модифицированных эластомеров. *Пластические массы*. 2001. № 6. С. 14–16.
5. Александровский С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия. М. : Стройиздат, 1966. 444 с.
6. Алексеев С. Н., Иванов Ф. М., Модры С, Шнель П. Долговечность железобетона в агрессивных средах. М. : Стройиздат, 1990. 320 с.
7. Афанасьев А. А. Возведение зданий и сооружений из монолитного железобетона. М. : Стройиздат, 1990. 380 с.
8. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона. М. : Стройиздат, 1981. 464 с.
9. Бабицкий В. В., Ковалев Я. Н. Прогнозирование коррозии железобетонных мостовых конструкций. *Бетон и железобетон*. 1999. №1. С. 109–112.
10. Баженов Ю. М., Вознесенский В. А. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона. М. : Стройиздат, 1974. 192 с.
11. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М. : Технопроект, 1998. 768 с.
12. Батраков В. Г. О структуре бетона с добавками кремнийорганических соединений в связи с его морозостойкостью. *Коррозия железобетона и методы защиты. Труды НИИЖБ*. М. 1962. Вып. 28. С. 78–81.

13. Берг О. Я., Щербаков Е. Н., Писанко Г. Н. Высокопрочный бетон. М. : Стройиздат, 1971. 208 с.
14. Беркман А. С., Мельников И. Г. Структура и морозостойкость строительных материалов. М. : Госстройиздат, 1962. 166 с.
15. Бутт Ю. М., Колбасов В. М., Берлин Л. Е. Исследование влияния структуры цементного камня на морозостойкость. *Бетон и железобетон*. 1972. – 125 с.
16. Вербицкий Г. П. Прочность и долговечность бетона в водной среде. М. : Стройиздат, 1979. 224 с.
17. Виноградов Б. Н. Влияние заполнителей на свойства бетона. М. : Стройиздат, 1979. 223 с.
18. Вода в полимерах: Пер с англ. / Под ред. С. Роуланда. М. : Мир, 1984. 555с.
19. Волженский А. В. Влияние дисперсности портландцемента и В/Ц на долговечность камня и бетонов. *Бетон и железобетон*. 1990. № 10. С. 16–17.
20. Волженский А. В., Буров Ю. С., Колокольников В. Д. Минеральные вяжущие вещества. М. : Стройиздат, 1979. 476 с.
21. Выровой В. Н., Закорчемная Н. О., Фиц С. Анализ механизмов морозного разрушения строительных композитов. *Моделирование и оптимизация в материаловедении. МОК–44*. Одесса : Астропринт. 2004. С. 84–85.
22. Выровой В. Н., Закорчемная Н. О., Закорчемный Ю. О. Анализ механизма развития трещин при замерзании в их объеме воды. *Вісник ДонНАБА. Сучасні будівельні матеріали. Композиційні матеріали для будівництва*. Макіївка, 2007. Вип. 2007-1(63). С.96–100.
23. Выровой В. Н., Дорофеев В. С., Фиц С. Бетон в условиях ударных воздействий. Одесса : Внешрекламсервис, 2004. 271 с.
24. Выровой В. Н., Коробко О. А., Непомящий А. Н. Роль деформаций в формировании начальной поврежденности конструкции-системы. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк, 2015. Вип. 3. С.45–52.

25. Выровой В. Н., Ширяева Н. Ю., Макарова С. С. Оценка влияния технологической поврежденности при помощи коэффициента интенсивности напряжений. *Принятие рецептурно–технологических решений по экспериментально–статистическим моделям*. Одесса. 1994. С.5–6.
26. Способ выявления трещин в бетонных и железобетонных конструкциях на неорганическом вяжущем: пат. 59304 Украина. №5008907/33; заявл. 03.07.1991.
27. Выровой В. Н., Суханов В. Г., Коробко О. А., Закорчемная Н. О., Непомящий А. Н. Сопротивление морозному разрушению бетонов для дорожного покрытия. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2015. Вип. 58. С.88–95.
28. Выровой В. Н. Усталостная прочность композиционных строительных материалов в условиях увлажнения и высушивания. *Работоспособность строительных материалов в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов*. Казань, 1984. С. 59–61.
29. Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика. М. : Наука, 1982. 584 с.
30. Глубіш П. А. Розробка та дослідження протиморозної добавки амкармет для товарного бетону. *Будівельні конструкції*. К., 2002. Вип. 56. С. 3–8.
31. Голубых Н. Д. Внутренние напряжения в бетоне при термоциклическом воздействии. *Совершенствование технологии производства бетонов повышенной прочности и долговечности*. Уфа, 1985. С. 100–101.
32. Гончаренко В. В., Хлебникова О. С. Усталостное разрушение асфальтобетонных покрытий под действием циклических нагрузок. *Дороги і мости*. К., 2006. Вип. 5. С. 148–154.
33. Гордон Дж. Почему мы не проваливаемся сквозь пол: Пер с англ. М. : 1971. 272 с.
34. Гордон С. С. Структура и свойства тяжелых бетонов на различных заполнителях. М. : Стройиздат, 1969. 125 с.

35. Горчаков Г. И. Зависимость морозостойкости бетонов от их структуры и температурных деформаций. Бетон и железобетон. М. : Госстройиздат, 1972. 107 с.
36. Горчаков Г. И., Лифанов Н. И., Терехин Л. Н. Коэффициенты термического расширения и температурные деформации строительных материалов. М.: Издательство комитета стандартов, мер. и измерительных приборов при Сов. Мин. СССР, 1968. 168 с.
37. Горчаков Г. И., Мурадов Э. Г. Основы стандартизации и управления качеством продукции промышленности строительных материалов. М. : Высшая школа, 1987. 333 с.
38. Горчаков Г. И., Капкин М. М., Скрамтаев Б. Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. М. : Стройиздат, 1965. 195 с.
39. Горчаков Г. И., Орендлихер Л. П., Савин В. И. и др. Состав, структура и свойства цементных бетонов. М. : Стройиздат, 1976. 144 с.
40. Горчаков Г. И., Баженов Ю. М. Строительные материалы. М : Стройиздат, 1986. 688 с.
41. Гранковский И. Г. Структурообразование в минеральных вяжущих системах. К. : Наукова думка, 1984. 299 с.
42. Грушко И. М. Ильин А. Г., Чихладзе Э. Д. Повышение прочности и выносливости бетона. Х. : Вища школа, 1986. 152 с.
43. Гузеев Е. А., Пирадов К. А., Манаев Т. Л., Мочалов А. Л. Оценка морозостойкости бетона по параметрам механики разрушения. *Бетон и железобетон*. 2000. №3. С. 26–27.
44. Гусев Б. В., Файвусович А. С. К построению общей теории морозостойкости бетона. *Збірник наукових праць луганського національного аграрного університету. Технічні науки (Будівництво)*. Луганськ, 2004. № 40 (52). С. 286–298.
45. Дворкін Л. Й. Будівельне матеріалознавство. Рівне : РДТУ, 1999. 478 с.

46. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. О подобии структур морозостойкости бетонов. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2003. № 1. С. 34–37.
47. Дворкин Л. И. Оптимальное проектирование составов бетона. Львов : Вища школа, 1981. 159 с.
48. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Основы бетоноведения. Санкт–Петербург : ООО "Строй–Бетон", 2006. 689 с.
49. Дементьев Г. К. Условия долговечности бетона и железобетона. Куйбышев : Куйбышевское книжное издательство, 1955. 120 с.
50. Дикун А. Д., Фишман В. Я., Нагорняк И. Н., Тюрина Т. Е. Прогнозирование морозостойкости бетона. *Строительные материалы*. 2003. № 11. С. 28–30.
51. Добролюбов Г., Ратинов В. Б., Розенберг Т. И. Прогнозирование долговечности бетона с добавками. М. : Стройиздат, 1983. 212 с.
52. Добшиц Л. М. Получение бетонов повышенной долговечности для транспортных, промышленных и гражданских сооружений. *Проблемы долговечности зданий и сооружений в современном строительстве*. С-Пб. 2007. С. 25–28.
53. Домокеев А. Г. Строительные материалы. М. : Высшая школа, 1989. 495 с.
54. Дорофеев В. С., Выровой В. Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. Одесса : Місто майстрів, 1998. 165 с.
55. ДСТУ Б В.2.7-47-96. Бетоны. Методы определения морозоустойчивости. Общие требования. [Действителен от 1997-04-01]. Изд. офиц. Киев, 1997. 15 с. (Информация и документация).
56. Закорчемная Н. О., Выровой В. Н., Закорчемный Ю. О. Анализ влияния наполнителей на изменение поврежденности строительных композитов при их попеременном замораживании и оттаивании. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2006. №23. С.63–68.

57. Закорчемная Н. О., Выровой В. Н., Фиц С. Анализ механизмов морозного разрушения бетонов. *Компьютерное материаловедение и обеспечение качества: МОК-45*. Одесса, 2006. С. 105.
58. Закорчемная Н. О., Выровой В. Н., Закорчемный Ю.О. Анализ механизмов морозного разрушения строительных композитов. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2005. №20. С.148–154.
59. Закорчемная Н. О. Анализ процессов, сопровождающих замерзание воды в трещинах. *Моделювання в комп'ютерному матеріалознавстві: матеріали до 46-го міжнародного семінару з моделювання і оптимізації композитів – МОК'46*. Одеса, 2007. С. 181.
60. Закорчемная Н. О., Выровой В. Н., Закорчемный Ю. О., Резникова Л. И. Механизм морозного разрушения строительных композитов. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне, 2006. С. 105–108.
61. Закорчемная Н. О., Выровой В. Н., Закорчемный Ю. О. Моделирование механизмов развития деформаций при замерзании воды в трещинах. *Проектування бетонів із заданими властивостями*. Рівне, 2006. С. 116–120.
62. Златковський О. А. Особливості льодоутворення при заморожуванні цементного каменю в бетоні : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05. Харків, 2001. 16 с.
63. Иванов Ф. М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии. М. : Транспорт, 1968. 174 с.
64. Иванов Ф. М., Крылов В. В., Гладков В. С. Расчет повреждения бетонов при однократном замораживании и оттаивании. *Совершенствование технологии производства бетонов повышенной прочности и долговечности*. Уфа, 1985. С. 91–92.
65. Илькевич К. Я. Строительные вяжущие вещества, бетонные ("огнестойкие") постройки и их санитарная оценка. Москва : В.А. Поздняков, 1915. 266 с.

66. Капкин М. М., Мазур Б. М. Морозостойкость бетонов при низких отрицательных температурах. *Бетон и железобетон*. 1964. №7. С. 7–10.
67. Кожушко В. В., Гиньов Д. В., Колесник Д. Ю. Водостійкість і морозостійкість – основні фактори запобігання руйнуванню будівельних конструкцій з гіпсобетону. *Дороги і мости*. К., 2005. Вип. 3. С. 111–117.
68. Комохов П. Г., Латыпов В. М., Латыпова Т. В., Ваганов Р. Ф. Долговечность бетона и железобетона. Уфа : Белая река, 1998. 216 с.
69. Комохов П. Г., Попов В. П. Энергетические и кинетические аспекты механики разрушения бетона. Самара: Изд-во Самарского филиала секции "Строительство" РИА, 1999. 111 с.
70. Коробко О. А., Выровой В. Н., Непомящий А. Н., Шевченко В. В. Спонтанная перестройка структуры бетона при знакопеременных воздействиях. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне, 2016. Вип. 33. С. 54–61.
71. Коробко О. О., Вировой В. М., Уразманова Н. Ф., Непомящий О.М. Підвищення стійкості будівельних виробів при малоцикловій утомі бетону. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне, 2018. Вип. 36. С. 124–131.
72. Красильников К. Г., Никитина Л. В., Скобинская Н. Н. Физико-химия собственных деформаций цементного камня. М. : Стройиздат, 1980. 56 с.
73. Красный И. М. Исследования морозостойкости мелкозернистых бетонов. *Бетон и железобетон*. 1969. № 12. С. 33–35.
74. Кривенко П. В., Пушкарева Е. К. Долговечность шлакощелочного бетона. К. : Будівельник, 1993. 224 с.
75. Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Кочевих М. О. Заповнювачі для бетону. Київ : Фада, ЛТД, 2001. 399 с.
76. Кривенко П. В. Современные проблемы долговечности бетона: состояние и перспективы. *Сучасні проблеми бетону його технологій*. Киев, 2002. Вип. 56. С. 15–28.

77. Кунцевич О. В. Бетоны высокой морозостойкости для крайнего севера. М. : Стройиздат, 1981. 190 с.
78. Кунцевич О. В., Магомедэминов И. И. Исследование прочности и морозостойкости растворов с комплексными добавками. *Повышение долговечности бетона транспортных сооружений*. Москва, 1980. Вып. 662. С. 26–34.
79. Ларионова З. М. Формирование структуры цементного камня и бетона. М. : Стройиздат, 1971. 161с.
80. Лермит Р. Проблемы технологии бетона. М. : Госстройиздат, 1959. 294 с.
81. Литвиненко А. С. Исследование цикличности погодно-климатических условий Украины в связи с прогнозированием влияния опасных природных явлений на состояние автомобильных дорог. *Дороги і мости*. К., 2006. Вип. 5. С. 74–90.
82. Лыков А. В. Теория сушки. М. : Энергия, 1968. – 472 с.
83. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. М. : Госэнергоиздат, 1956. 464 с.
84. Магдалиц-Ковалева Л. Л., Плащенко А. А., Траголова Ю. А. Повышение долговечности и эксплуатационной надежности сборных железобетонных конструкций. *Бетон и железобетон*. 1999. № 1. С 36–40. Мазур Б. М. О методике испытаний морозостойкости бетонов. *Тр. координац. совещ. по гидротехнике*. Л., 1963. Вып. 41. С.72–77.
85. Мачюлайтис Р. В., Нагроцкене Д. И., Кичайт А. П. Долговечность керамической облицовки по морозостойкости. *Стекло и керамика*. 2003. №4. С. 25–28.
86. Мещанский Н. А. Повышение стойкости строительных материалов и конструкций, работающих в условиях агрессивных сред. М. : Госстройиздат, 1962. С. 228–232.
87. Миронов С. А., Лагойда А. В. Бетоны, твердеющие на морозе. М. : Стройиздат, 1975. 264 с.

88. Миронов С. А. Механизмы замерзания и твердения бетона при отрицательных температурах. *Второй Междунар. симпозиум по зим. бетонированию*. М. 1975. С. 23.
89. Миронов С. А. Гидратация и твердение цемента на морозе. *Шестой международный конгресс по химии цемента*. М., 1976. С. 350.
90. Миронов С. А. Теория и методы зимнего бетонирования. М. : Стройиздат, 1975. 700 с.
91. Миронов С. А. Теория и методы зимнего бетонирования. М. : Стройиздат, 1975. 700 с.
92. Зимнее бетонирование и тепловая обработка бетона / Миронов С. А. и др. М. : Стройиздат, 1975. 248 с.
93. Москвин В.М., Капкин М.М. Влияние низких отрицательных температур на деформативность цементного камня. *Коррозия железобетона и методы защиты*. М., 1962. Вып. 28. С. 122–127.
94. Москвин В. М., Подвальный А. М. О морозостойкости и долговечности железобетонных конструкций. *Коррозия бетона и методы их защиты. Труды НИИЖБ*. М., 1960. Вып. 15. С. 35–39.
95. Невиль А. М. Свойства бетона. М. : Стройиздат, 1972. 344 с.
96. Нерубенко С. Л., Гвоздев В. А. Бетон на рубеже третьего тысячелетия. *Материалы I-ой всероссийской конференции по проблемам бетона и железобетона*. М., 2001. Книга 3. С. 1715–1721.
97. Непомнящий О. М. Вплив місцевого заморожування на стійкість будівельних композитів. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті*. Харків, 2017. С.86.
98. Непомнящий А. Н., Выровой В. Н. Анализ методов количественной оценки поврежденности материала конструкции. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2016. Вип. 63. С.174–178.
99. Nepomyashchy O. M., Vyrovoy V. M., Makarova S. S., Khomenko A. A. Frost Resistance of Construction Composites During One-sided Freezing. *Bulletin of*

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Odessa, 2020. no.79. P. 109–116.

100. Непомящий А. Н., Выровой В. Н., Суханова С. В., Сушицкий Е. Б. Влияние локального замораживания на свойства бетона. *Експлуатація та реконструкція будівель і споруд*. Одеса, 2019. С.111.

101. Непомящий А. Н., Выровой В. Н., Суханов В. Г. Влияние условий замораживания на морозостойкость строительных композитов. *Експерт: теория и практика*. Тольятти, 2020. №4 (7). С. 41–46.

102. Непомящий О. М., Вировой В. М., Хоменко А. О., Закорчемна Н. О. Морозостійкість будівельних композитів при односторонньому заморожуванні. *Гідротехнічне і транспортне будівництво*. Одеса, 2020. С. 71-75.

103. Непомящий А. Н., Выровой В. Н., Хоменко А. А., Макарова С. В. Воздействие условий замораживания на свойства композиционных строительных материалов. *Моделирование и оптимизация строительных композитов*. Одесса, 2019. С. 126–129.

104. Непомящий А. Н., Хоменко А. А., Портасова А. Д. Циклические воздействия окружающей среды на конструкцию. *Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій*. Одеса, 2018. С. 106–109.

105. Непомящий А. Н., Макарова С. С., Ткаченко Т. Г. Вплив умов заморожування на морозостійкість бетонів. *Моделирование и оптимизация строительных композитов*. Одесса, 2018. С. 103–106.

106. Непомящий О. М. Моделювання морозостійкості будівельних композитів при односторонньому заморожуванні. *Моделювання та оптимізація будівельних композитів*. Одеса, 2020. С. 106–110.

107. Непомящий А.Н. Портасова А.Д. Циклические локальные воздействия окружающей среды на структуру КСМ. *Тези доповіді до 74 науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу*. Одеса, 2018. С.22.

108. Непомящий А. Н., Хоменко А. А., Ткаченко Г. Г., Каменских А. С. Воздействие одностороннего замораживания-оттаивания на бетон.

Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій. Одеса, 2019. С. 70–71.

109. Ольгинский А. Г., Чернявский В. А. Влияние среды на адаптацию зоны контакта заполнителей с цементным камнем в бетоне. *Бетон и железобетон.* 2000. № 4. С. 5–8.

110. Осетинский Ю. В., Подвальный А. М. О выборе модели для расчета собственных напряжений в бетоне. *Механика композитных материалов.* 1982. № 5. С. 789–796.

111. Пантелеев А. С., Колбасов В. М. Цементы с минеральными добавкам и микрозаполнителями. *Новое в химии и технологии цемента.* М., 1971. С. 155–164.

112. Партон В. З. Механика разрушения: От теории к практике. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1990. 240 с.

113. Пинус Б. И., Гузеев Е. А. Вероятностная оценка коэффициента условий работы бетона при низкотемпературных воздействиях. *Материалы конференций и совещаний по гидротехнике, ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева.* 1991. С. 303-307.

114. Пирадов К. А., Мамаев Т. Л., Кожобеков Т. А., Марченко С. М. Прогнозирование морозостойкости бетона на основе фундаментальных положений механики разрушения. *Бетон на рубеже третьего тысячелетия.* М., 2001. Книга 3. С. 1490–1494.

115. Подвальный А. М., Осетинский Ю. В. Вероятностная модель поведения бетона при циклическом воздействии среды. *Строительная механика и расчет сооружений.* 1982. №2. С. 28–33.

116. Подвальный А.М. Механизм морозного разрушения бетонных и железобетонных конструкций. *Материалы II Междунар. конф. "Бетон и железобетон. Пути развития".* М., 2005. Том 6. С. 171–178.

117. Подвальный А. М. О концепции обеспечения морозостойкости бетона в конструкциях зданий и сооружений. *Строительные материалы.* 2004. № 6. С. 4–6.

118. Подвальный А.М. О собственных напряжениях, возникающих в бетоне при замораживании. *ИФЖ*. 1973. т. XXV. №2. С. 316–324.
119. Подгорнов Н. И. Влияние методов термообработки бетона на его долговечность. *Промышленное и гражданское строительство*. 2005. № 12. С 31–32.
120. Ратинов В. Б., Розенберг Т. Н. Добавки в бетон. М. : Стройиздат, 1989. 187 с.
121. Ристич М. М. Основы науки о материалах. К. : Наукова думка, 1984. 152 с.
122. Руководство по применению бетонов с противоморозными добавками. *НИИЖБ Госстроя СССР*. 1973. 26 с.
123. Рыбьев И. А. Общий курс строительных материалов. М. : Высшая школа, 1987. С. 77–90.
124. Савицкий А. И., Гуменюк Н. Г. К вопросу о напряжениях в бетоне при испытании на морозостойкость. Уфа, 1985. С. 102–103.
125. Саницкий М. А., Шихненко И. В., Вандаловская Л. А., Жерновой С. В. Добавки в бетоны, твердеющие на морозе. *Строительные материалы и конструкции*. 1993. № 1. С 11.
126. Свиридов Н. В. Повышение долговечности цементобетонных аэродромных покрытий. М. : Транспорт, 1979. 167 с.
127. Сизов В. Н. Строительные работы в зимних условиях. Л. : Стройиздат, 1954. 452 с.
128. Солодкий С. Й., Русин Р. М., Гайванович Р. В., Поваленко М. В. Оцінка тріщиностійкості дорожніх бетонів за критеріями механіки руйнування. *Дороги і мости*. К., 2006. Вип. 6. С. 289–304.
129. Солодкий С. Й., Русин Р. М. Тріщиностійкість дорожніх модифікованих бетонів на основні композиційних цементів. *Композиційні матеріали для будівництва*. Макіївка, 2004. Вип. 2004–1(43). Том 2. С. 19–22.
130. Соломатов В. И., Выровой В. Н., Аббасханов Н. А. Бетон как композиционный материал. Ташкент : УзНИИНТИ, 1984. 31 с.

131. Соломатов В. И., Выровой В. Н., Дорофеев В. С., Сиренко А. В. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости. К. : Будівельник, 1991. 144 с.
132. Соломатов В. И., Бобрышев А. Н., Химмлер К. Г. Полимерные композиционные материалы в строительстве. М. : Стройиздат, 1988. – 312 с.
133. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов / В. И. Соломатов и др. Ташкент : ФАН, 1991. 345 с.
134. Степанова В. Ф. Проблема долговечности зданий и сооружений (от конференции до конференции). *Проблемы долговечности зданий и сооружений в современном строительстве*. С-Пб., 2007. С. 12–15.
135. Степанова В. Ф. Пути повышения долговечности зданий и сооружений. *Дни современного бетона*. Запорожье, 2008. С. 59–64.
136. Стольников В. В. Исследования по гидротехническому бетону. М. : Госэнергоиздат, 1962. 330 с.
137. Стольников В. В. О теоретических основах сопротивляемости цементного камня и бетонов чередующимся циклам замораживания и оттаивания. Л. : Энергия, 1970. 67 с.
138. Сумгин М. И. Метод замораживания воды в пленочном состоянии. *Сб. ЦИАТ*. Л., 1932. С. 48–51.
139. Ушеров-Маршак А. В. Калориметрия цемента и бетона. Харьков: Факт, 2002. 177 с.
140. Файнер М. Ш. Новые закономерности в бетоне. К. : Наукова думка, 2002. 448 с.
141. Ферронская А. В. Экологические аспекты повышения долговечности конструкций из бетона и железобетона. *Проблемы долговечности зданий и сооружений в современном строительстве*. С.-Пб., 2007. С. 25–28.
142. Хрулев В. М., Тентиев Ж. Т., Курдюмова В. М. Состав и структура композиционных материалов. Башкек: Полиглот, 1997. 124 с.
143. Чарнецки Л., Курдовски В. Будущее бетона. *Современные бетоны*. Запорожье, 2007. С. 13–24.

144. Чернявский В. Л. Адаптация бетона. Днепр : Нова Ідеологія, 2002. – 116 с.
145. Шейкин А. Е., Добшиц Л. М. Морозостойкость бетонов с противоморозными добавками. *Повышение долговечности бетонов транспортных сооружений*. М., 1986. С. 5–9.
146. Шейкин А. М., Эккель С. В. О применении дилатометрического метода для прогнозирования морозостойкости дорожного бетона. *Строительные материалы*. 2004. № 12. С. 50–51.
147. Шейкин А. Е. Прогнозирование морозостойкости бетона при выборе его состава. *Бетон и железобетон*. 1979. № 11. С. 25–26
148. Шейкин А. Е., Чеховский Ю. В., Бруссер М. И. Структура и свойства цементных бетонов. М. : Стройиздат, 1979. 344 с.
149. Шейкин А. Е., Добшиц Л. М. Цементные бетоны высокой морозостойкости. Л. : Стройиздат, 1989. 128 с.
150. Шестоперов, С. В. Долговечность бетона. М. : Автотрансиздат, 1960. 512 с.
151. Шестоперов С. В. Долговечность бетона. М. : Автотрансиздат. 1970. 267с.
152. Шестоперов В. С. Цементный бетон в дорожном строительстве. М.: Дориздат, 1950. 132 с.
153. Шлаен А. Г. Пути повышения морозостойкости бетонных и железобетонных конструкций в гидромелиоративном строительстве. М. : ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1976. № 11. 35 с.
154. Штарк Иохан, Бернд Вихт Долговечность бетона. Киев: Оранта, 2004. 295 с.
155. Beton wedlug normy PN–EN 206–1 – komentarz. Praca zbiorowa podkierunkiem G. Czaraeckiego. Polski Cement, Krakow, 2004. 298 s.
156. Sanitsky M., Melnyk M., Chaba P. High Early Strenght Portland Cement Binders for Using at Low, Ambient and Elevated Temperatures. *Proceedings of the*

International Congress "Concrete in the Service of Mankind" Theme 6: New Materials Technology. E & FN SPON, 1996. P. 649–654.

157. Kazimierz F. Wpływ napreżeń własnych na destrukcję napreżeniową i parametry wytrzymałościowe betonu. *Inżynieria i budownictwo* 6. Kraków, 1995. C. 315–322.

158. Koh Y., Kamada E. The influence of pore Structure of Concrete Made with Absorptive Aggregates on the Frost Durability of Concrete. Prague : PJLEM Symposium, 1973. p. 45–65.

159. Matsuda O. The influence of hardened conditions on hydrate newformation morphology. *Cement and concrete resistance*. 1985. № 3. P. 2–4.

160. Nepomyach A. N., Vyrovoy V. N., Chistyakov A. A. Frost resistance of cement-sand and concrete beams during unilateral freezing. *Croatian Regional Development Journal*. 2021. Vol. 1, no. 2. Pp. 1-12.

161. Powers, T. C. Working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. *J. Am. Coner. Inst.* 1945. No. 4. V. 16.

162. Powers T. C., R. A. Helmuth. Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing. *Proceedings Highway Research Board*. 1953. V. 32.

163. Rusin Z. Technologia betonów mrozodpornych. Kraków: Polski cement Sp. zoo., 2002. 182 c.

164. Sanitsky M.A., Melnyk V.M., Loza M.Z, Shichnenko I.V. Testing of the freeze-thaw resistance portlandcement compositions by low temperature dilatometry. *International workshop*. Essen (Germany), 1997. P. 261–268.

ДОДАТКИ



65003, Украина, г. Одесса, ул. Атамана Чепиги 35/2
тел. (0482) 371355/371377, факс (0482) 358813
office@element.net.ua http://www.element.net.ua

вих. №1608/1
від 16 серпня 2021 р.

Акт
про впровадження результатів наукових досліджень
у ТОВ «ЕЛЕМЕНТ»

Цей акт підтверджує, що результати наукових досліджень аспіранта Непом'яшого Олександра Миколайовича, виконані під керівництвом д.т.н. проф. Вирового Валерія Миколайовича були використані у ТОВ «ЕЛЕМЕНТ». На виробничій базі проведено бетонування залізобетонних елементів з урахуванням зовнішніх кліматичних факторів та експлуатації при односторонньому впливі циклічного заморожування та відтавання. Загальна кількість виготовлених залізобетонних елементів об'ємом 15 м³.

Аналіз дозволив зробити висновок, що морозне руйнування має відбуватися через розвиток тріщин. Вже при першому циклі заморожування зволоженого матеріалу технологічні тріщини можуть змінити свої параметри перетворюючись в тріщини експлуатації.

Процеси, що відбуваються при замерзанні вільної води в початкових тріщинах, показали, що тиск льоду викликає збільшення ширини розкриття тріщини, веде до збільшення її обсягу, зниження внутрішнього тиску.

Проведені дослідження показали, що при односторонньому заморожуванні зміна маси, глибини карбонізації, коефіцієнтів пошкодженості та фізико-механічних характеристик відбувається менш інтенсивно в порівнянні з всебічним впливом негативних температур.

Акт не має фінансової складової і засвідчує використання результатів наукових досліджень.

Директор ТОВ «ЕЛЕМЕНТ» Кіров Ф.М.



Продовження додатку А



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, тел./факс: (048) 723-69-04, тел. (048) 723-43-53,
E-mail: list@odaba.org.ua, веб-сайт: www.odaba.edu.ua, код ЄДРПОУ 02071033

18.10.2011 № 29-866

Г

7

На № _____ від _____

Довідка

про впровадження результатів наукових досліджень

Результати досліджень за дисертаційною роботою «Механізм опору морозному руйнуванню будівельних конструкцій» здобувача наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та вироби Непом'яшого Олександра Миколайовича впроваджені у навчальний процес Одеської державної академії будівництва та архітектури, а саме використовується при викладанні освітньої компоненти «Бетони та будівельні розчини» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Проректор з НГР



Кругтій Ю.С.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Выровой В. Н., Коробко О. А., Непомящий А. Н. Роль деформаций в формировании начальной поврежденности конструкции-системы. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк, 2015. Вип. 3. С.45–52.
2. Выровой В. Н., Суханов В. Г., Коробко О. А., Закорчемная Н. О., Непомящий А. Н. Сопротивление морозному разрушению бетонов для дорожного покрытия. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2015. Вип. 58. С.88–95.
3. Коробко О. А., Выровой В. Н., Непомящий А. Н., Шевченко В. В. Спонтанная перестройка структуры бетона при знакопеременных воздействиях. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне, 2016. Вип. 33. С. 54–61.
4. Непомнящий А. Н., Выровой В. Н. Анализ методов количественной оценки поврежденности материала конструкции. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2016. Вип. 63. С.174–178.
5. Коробко О. О., Вировой В. М., Уразманова Н. Ф., Непомящий О.М. Підвищення стійкості будівельних виробів при малоцикловій утомі бетону. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне, 2018. Вип. 36. С. 124–131.
6. Nepomyashchy O. M., Vyrovoy V. M., Makarova S. S., Khomenko A. A. Frost Resistance of Construction Composites During One-sided Freezing. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. Odessa, 2020. no.79. P. 109–116.

Продовження додатку Б

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:

7. Непомящий А. Н., Выровой В. Н., Суханов В. Г. Влияние условий замораживания на морозостойкость строительных композитов. *Эксперт: теория и практика*. Тольятти, 2020. №4 (7). С. 41–46.

DOI: 10.24411/2686-7818-2020-10034 ISSN: 2686-7818

8. Nepomyach A. N., Vyrovoy V. N., Chistyakov A. A. Frost resistance of cement-sand and concrete beams during unilateral freezing. *Croatian Regional Development Journal*. 2021. Vol. 1, no. 2. Pp. 1-12.

DOI: 10.31650/2415-377X-2020-79-109-116 ISSN: 2718-4978

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Непомящий О. М. Вплив місцевого заморожування на стійкість будівельних композитів. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті* : тези доп. 6-ї міжнар. наук.-техн. конф. Харків, 2017. С.86.

10. Виноградский В. М., Ткаченко Г. Г., Непомнящий А. Н., Портасова А. Д. Характер изменения свойств бетонов при одностороннем замораживании изделий. *Експлуатація та реконструкція будівель і споруд* : тези доп. II міжнар. конф., м. Одеса, 16-17 листоп. 2017 р. Одеса, 2017. С. 21–24.

11. Елькин А. В., Выровой В. Н., Шевченко В. В., Непомнящий А. Н. Роль активных элементов структуры в формировании свойств строительных композитов. *Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси* : зб. Тез доп. другої наук.-практ. конф. (м. Одеса, 27-29 вересня 2018 р.). Одеса, 2018. С. 75.

12. Непомящий А. Н., Макарова С. С., Ткаченко Т. Г. Вплив умов заморожування на морозостійкість бетонів. *Моделирование и оптимизация строительных композитов* : материалы междунар. сем., г. Одесса, 22-23 нояб. 2018 г. Одесса, 2018. С. 103–106.

Продовження додатку Б

13. Непомящий А. Н., Хоменко А. А., Портасова А. Д. Циклические воздействия окружающей среды на конструкцию. *Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій* : зб. тез доп. міжнар. конф. (м. Одеса, 11-13 квіт. 2018 р.). Одеса, 2018. С. 106–109.

14. Непомящий А. Н., Выровой В. Н., Хоменко А. А., Макарова С. В. Воздействие условий замораживания на свойства композиционных строительных материалов. *Моделирование и оптимизация строительных композитов* : материалы междунар. сем. г. Одесса, 21-22 нояб. 2019 г. Одесса, 2019. С. 126–129.

15. Непомящий А. Н., Хоменко А. А., Ткаченко Г. Г., Каменских А. С. Воздействие одностороннего замораживания-оттаивания на бетон. *Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій* : зб. тез міжнар. наук. конф. (м. Одеса, 23-24 квіт. 2019 р.). Одеса, 2019. С. 70–71.

16. Непомящий А. Н., Выровой В. Н., Суханова С. В., Сушицкий Е. Б. Влияние локального замораживания на свойства бетона. *Експлуатація та реконструкція будівель і споруд* : тези доп. III міжнар. конф., м. Одеса, 26-28 вересня 2019 р. Одеса, 2019. С.111.

17. Непомящий О. М., Вировой В. М., Хоменко А. О., Закорчемна Н. О. Морозостійкість будівельних композитів при односторонньому заморожуванні. *Гідротехнічне і транспортне будівництво* : зб. тез міжнар. наук.-техн. конф. (м. Одеса, 28-29 травня 2020 р.). Одеса, 2020. С. 71-75.

18. Непомящий О. М. Моделирование морозостойкости будівельних композитів при односторонньому заморожуванні. *Моделирование та оптимізація будівельних композитів* : матеріали міжнар. сем., м. Одеса, 3-4 грудня 2020 р. Одеса, 2020. С. 106–110.

Продовження додатку Б

19. Непомящий О. М., Вировой В. М., Макарова С. С., Реутська Е. В. Морозостійкість матеріалів в умовах одностороннього заморожування виробів. *Структуроутворення та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій* : зб. тез міжнар. наук.-техн. конф. (м. Одеса, 08-09 квітня 2021 р.). Одеса, 2021. С. 74–76.

Відомості про результати апробації дисертації

- 6-та міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті" (Україна, м. Харків, 2017 р. – заочна участь);

- II-га міжнародна конференція " Експлуатація та реконструкція будівель і споруд" (Україна, м. Одеса, 16-17 листопада 2017 р. – заочна участь);

- Друга науково-практична конференція "Проблеми та перспективи розвитку будівельного комплексу м. Одеси" (Україна, м. Одеса, 27-29 вересня 2018 р. – очна участь);

- Международный семинар "Моделирование и оптимизация строительных композитов" (Украина, г. Одесса, 22-23 ноября 2018 г. – очна участь);

- Міжнародна конференція "Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій" (Україна, м. Одеса, 11-13 квітня 2018 р. – очна участь);

- Международный семинар "Моделирование и оптимизация строительных композитов" (Украина, г. Одесса, 21-22 ноября 2019 г. – очна участь);

- Міжнародна наукова конференція "Структуроутворення, міцність та руйнування композиційних будівельних матеріалів і конструкцій" (Україна, м. Одеса, 23-24 квітня 2019 р. – очна участь);

Продовження додатку Б

- III-тя міжнародна конференція "Експлуатація та реконструкція будівель і споруд" (Україна, м. Одеса, 26-28 вересня 2019 р. – очна участь);
- Міжнародна науково-технічна конференція "Гідротехнічне і транспортне будівництво" (Україна, м. Одеса, 28-29 травня 2020 р. – заочна участь);
- Международный семинар "Моделирование и оптимизация строительных композитов" (Україна, м. Одеса, 3-4 грудня 2020 р. – очна участь);
- Міжнародна науково-технічна конференція "Структурування та руйнування композиційних будівельних матеріалів та конструкцій" (Україна, м. Одеса, 08-09 квітня 2021 р. – очна участь).