

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

НЕПОМЯЩІЙ ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 691.32

**МЕХАНІЗМ ОПОРУ МОРОЗНОМУ РУЙНУВАННЮ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

05.23.05 – Будівельні матеріали та вироби

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеській державній академії будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Вировой Валерій Миколайович**, Одеська державна академія будівництва та архітектури, професор кафедри виробництва будівельних виробів і конструкцій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Нетеса Микола Іванович**, Український державний університет науки і технологій, професор кафедри будівельного виробництва та геодезії.

кандидат технічних наук, доцент **Колохов Віктор Володимирович**, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, доцент кафедри технологій будівельних матеріалів, виробів та конструкцій.

Захист відбудеться «21» грудня 2021 р. о 14:00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.085.01 при Одеській державній академії будівництва та архітектури за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Одеської державної академії будівництва та архітектури за адресою: м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.

Автореферат розісланий «19» листопада 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради д.т.н., доцент



Кров'яков С.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 "Структурутворення, 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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.

Проведений аналіз погодних умов півдня України показав, що протягом тільки одного року може відбутися більше 70 випадків переходу температури від від'ємних до плюсових значень. 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 забезпечення їх морозостійкості.

Багаторічні та всебічні дослідження фахівців відмічають, 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 О.Л. Дворкіна, Л.М. Добшиця, Ф.М. Іванова, О.В. Кунцевича, Т.С. Пауерса, О.Є. Шейкіна, С.В. Шестоцьорова та багатьох інших, 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, на думку О.М. Бобришева, В.М. Вирового, В.С. Дорофєєва, В.І. Соломатова, С.Б. Фіца, Л.О. Шейніча та інших, присутні специфічні несучільності у вигляді тріщин та

внутрішніх поверхонь розділу. В роботах Є.А. Гузеєва, Ю.В. Зайцева, Н.О. Закорчемної, П.Г. Комохова, С.М. Леоновича, К.О. Пірадова, С.Й. Солодкого та інших вказується на значне зниження в'язкості руйнування бетонів та інших будівельних матеріалів при їхньому багаторазовому заморожуванні і відтаванні.

В діючих методах визначення морозостійкості передбачається об'ємне заморожування попередньо насичених водою (розчином) зразків. В той же час, як показав аналіз умов експлуатації, значна кількість виробів та конструкцій сприймає зовнішні погодні впливи однобічно. Це означає, що в матеріалі конструкції одночасно співіснують зони з від'ємною температурою та зони з плюсовою температурою (наприклад, опори мостів, зовнішні огорожувальні елементи, греблі, 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. Ці положення лягли в основу при формулюванні *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 у роботі.

Дослідження фізико-механічних властивостей цементного каменю, розчину та бетону проводили 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_n) в умовах багаторазового заморожування та відтавання.

Дослідження проводилися на зразках:

- розміром $4 \times 4 \times 16$ см – з цементного каменю ($B/C=0,28$) та розчину ($C/P=1/2$; $B/C=0,5$).

- розміром $10 \times 10 \times 10$ см та $10 \times 10 \times 40$ см – з бетону класу С30/35 (склад суміші: $C=315$ кг/м³, $P=660$ кг/м³, $C=1200$ кг/м³, $B=140$ л/м³).

Через кожних п'ять циклів заморожування-відтавання зразків контролювали зміну: маси (Δm), водопоглинання (W), швидкості проходження ультразвуку (V), коефіцієнта пошкодженості (K_n), міцності на розтяг при згині ($f_{c,tk}$), міцності на розтяг при розколюванні ($f_{c,m}$), міцності на стиск ($f_{c,cube}$),

коефіцієнта стійкості на розтяг при згині ($K_{\text{CT}}(f_{\text{c.tk}})$), коефіцієнта стійкості на розтяг при розколюванні ($K_{\text{CT}}(f_{\text{c.tn}})$) та коефіцієнта стійкості на стиск ($K_{\text{CT}}(f_{\text{c.cube}})$).

Для аналізу однобічного заморожування була розроблена оригінальна методика дослідження. Схема однобічного заморожування зразків показана на рис.1.

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

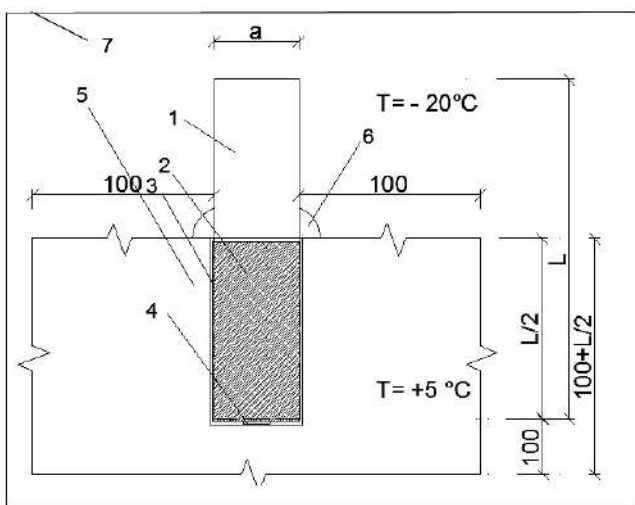


Рис. 1. Схема однобічного заморожування зразків:
 1 – частина зразка, яка піддавалась заморожуванню-відтаванню;
 2 – частина зразка, яка підтримувалась в плюсовому діапазоні температур;
 3 – фомісол;
 4 – термометр;
 5 – пінопласт; 6 – мінеральна вата;
 7 – морозильна камера

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

В третьому розділі наведені результати аналізу розподілу об'ємних локальних та загальних деформацій в зразках в залежності від умов їх заморожування.

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. Враховуючи розвиток сітки капілярів, формується таким чином фронт промерзання, який поступово витісняє вільну воду в глибинні об'єми зразків.

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).

Прийmemo, що при зволоженні зразка (рис.2.а.) вода повністю заповнює об'єм капілярів (рис.2.б.). Геометричні характеристики капілярів дозволяють

воді бути в різних станах: в вільному, в поліадсорбційному та в моноадсорбційному станах. Це передбачає, що зміна агрегатного стану води веде до зміни величини від'ємної температури, при якій вода переходить в тверде тіло.

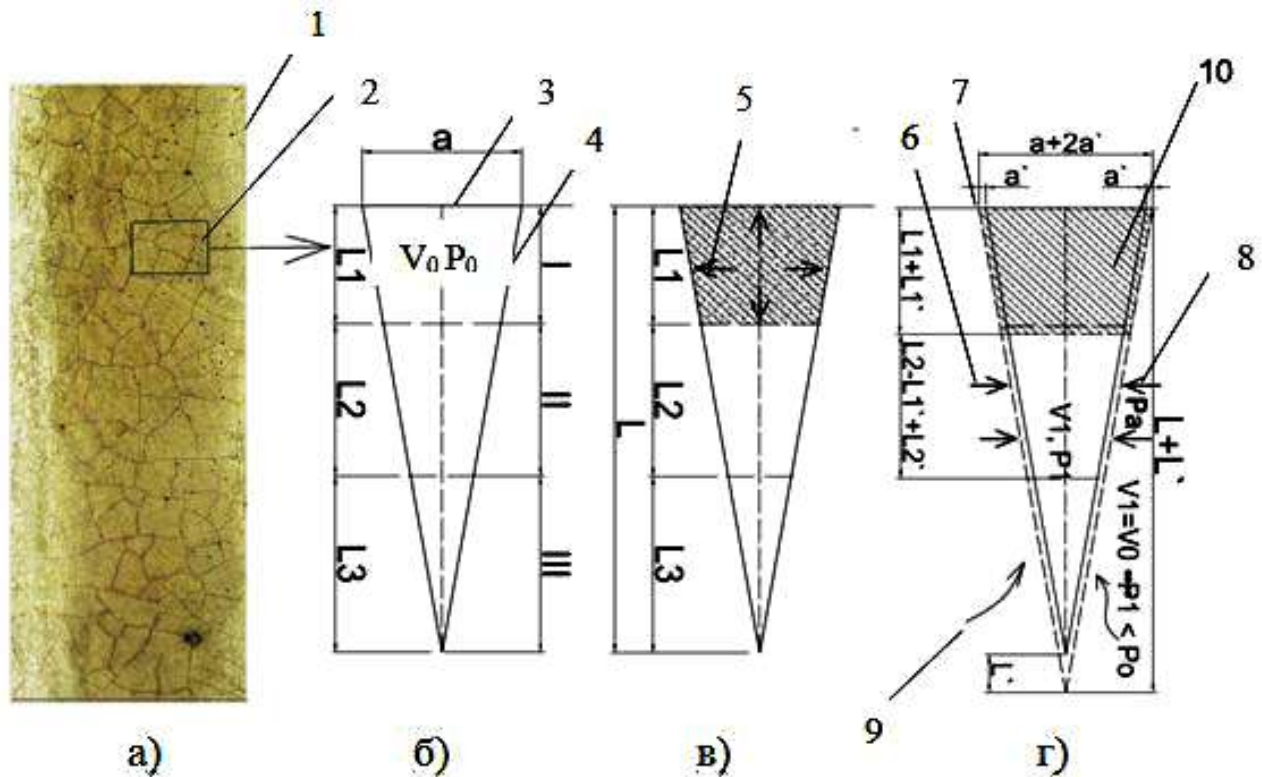


Рис.2. Характер зміни геометричних характеристик капіляра (тріщини) при замерзанні в його об'ємі води

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 несучильностей; 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); $V_1 \dots V_i$ ($P_1 \dots P_i$) – об'єм (тиск) при замерзанні вільної води

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 приблизно на 3%. Ймовірна схема напрямку об'ємних змін капіляра при замерзанні вільної води наведена на рис. 2.в.

Зміна геометричних характеристик несучільностей при одночасній зміні їх об'єму та внутрішнього тиску веде до прояву ефектів чергового масопереносу. Зниження внутрішнього тиску веде до міграції вільної води з глибинних об'ємів матеріалу (рис. 2.г.).

Процеси та явища, які розвиваються в окремому капілярі при замерзанні в ньому води, притаманні всій сітці несучільностей. Це дозволяє проаналізувати розвиток подій в інтегральній капілярно-пористій структурі матеріалу. Схема формування фронту промерзання при об'ємному заморожуванні зразка показана на рис.3.

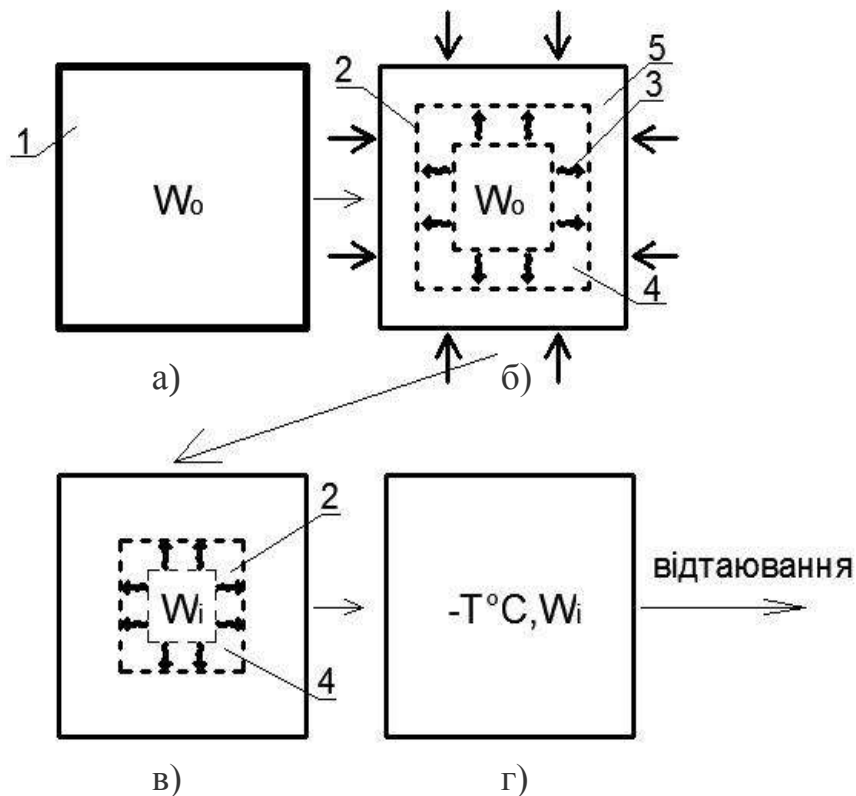


Рис.3. Схема формування фронту промерзання при об'ємному заморожуванні

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

За рахунок перепаду тиску в сітці капілярів відбувається направлена міграція води з глибинних об'ємів матеріалу, рис. 3.б,в. 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. Ймовірно, 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 з поверхневих шарів зразків.

При однобічному заморожуванні утворюється фронт промерзання (рис. 4), який, в свою чергу, ініціює процеси вологопереносу з частини зразка, яка знаходиться в плюсовій температурі. Це веде до насичення вологою перед фронтом промерзання (рис. 4.б), таким чином, в зразках не виникають градієнти водонасичення (рис. 4.в,г).

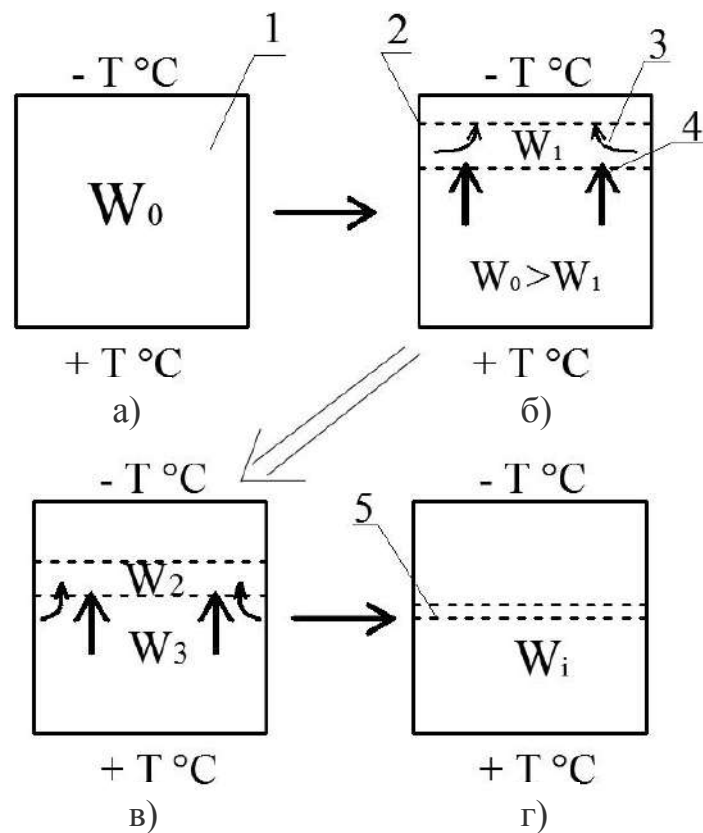


Рис.4. Схема формування фронту промерзання при однобічному заморожуванні зразка: а-г – процес однобічного заморожування зразка

- 1 – зразок; 2 – фронт промерзання; 3 – напрямок міграції капілярної води;
- 4 – напрямок адсорбційно-дифузійного переміщення води; 5 – зона метастабільного стану фронту промерзання; W_0 – загальне початкове водонасичення; $W_{1..i-1}$ – промерзла зона зниженого водонасичення;
- W_i - вологість зразка після циклічного заморожування

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 аналізували за допомогою графоаналітичного методу.

Графоаналітичний метод дозволяє виявити відносну величину переміщень окремих точок та напрям їх переміщень при сталій системі координат. Приведений аналіз епюр деформацій показав, що в залежності від початкових умов змінюється як відносні величини деформацій, так і напрями переміщень. Порівняння значень показало, що при однобічній дії від'ємних температур відносна величина деформацій в 1,5...3 рази менша порівняно з об'ємним заморожуванням. При зменшенні величини переміщень зменшується також градієнт напрямку переміщень окремих зон один відносно іншого.

Аналіз показав, що вже після одного циклу заморожування-відтавання зразки не повертаються в свій первинний стан. Збільшення кількості циклів збільшує 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.

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 відобразитись на зміні фізико-механічних показників матеріалу та його морозостійкості.

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

Структурні зміни цементного каменю, розчину та бетону аналізувались опосередковано за зміною коефіцієнтів пошкодженості в залежності від умов заморожування зразків. В якості прикладу на рис. 5 показана зміна K_n зразків із цементного каменю при їх циклічному однобічному заморожуванні.

Подібний характер зміни K_n притаманний зразкам і з розчину. Зі збільшенням кількості циклів заморожування-відтавання K_n в частині зразка, яка сприймає від'ємні температури, зростає в 4 рази (K_n в зоні плюсових температур зростає на 20 %). Для всіх зразків прослідковується своєрідний структурний перехід від однієї до іншої зони.

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 солі залишається в капілярно-поровому просторі матеріалів. При збільшенні кількості несучільностей

змінюється кількість солі, що не дає змогу об'єктивно оцінити зміну водопоглинання. Прямим підтвердженням залежності зміни структури від умов заморожування є результати по зміні швидкості проходження ультразвуку в різних зонах зразків.

Зміна структури та зміни фізичних характеристик в залежності від умов заморожування зразків викликають зміну міцності на розтяг при згині ($f_{c.tk}$) та на стиск ($f_{c.cube}$) цементного каменю та розчину.

Проведені дослідження показали, що при однобічному заморожуванні-відтаванні змінюється розподіл об'ємних деформацій та дифузійний масопереніс, що призводить до зміни структури в різних об'ємах зразка (виробу). В свою чергу зміна структури викликає неоднакову зміну механічних характеристик матеріалу в різних частинах зразка. Особливо це помітно при визначенні впливу умов заморожування на зміну міцності на стиск. Міцність на стиск частини зразка, яка заморожувалась, до 20 % менше порівняно з міцністю матеріалу, який не сприймав дію від'ємних температур. Більш ніж на 25% зменшилась міцність розчину в частині, яка сприймала циклічне заморожування-відтавання.

Таким чином, при однобічному заморожуванні змінюються механічні властивості матеріалу по всьому перетину зразка (виробу, конструкції).

У випадку об'ємного заморожування міцність на стиск цементного каменю знизилась після 20 циклів заморожування-відтавання більш ніж на 78% (з $f_{c.cube} = 73,4 \text{ МПа}$ до $f_{c.cube} = 41,3 \text{ МПа}$). Коефіцієнт стійкості після 20 циклів об'ємного заморожування $= 0,56$. Зразки покрилися тріщинами, відколами, що не дозволило продовжувати дослідження.

Коефіцієнт стійкості на стиск зразків з розчину після 20 циклів при об'ємному заморожуванні $= 0,71$, при однобічному заморожуванні – $0,90$.

Збільшення кількості циклів до 40 призвело до подальшого зменшення коефіцієнта стійкості на стиск при всебічному заморожуванні до $0,64$; при однобічному – до $0,78$.

Більш чутливою характеристикою до структурних змін в зразках виявилась міцність на розтяг при згині, коефіцієнт стійкості на розтяг при згині для зразків із цементного каменю після 20 циклів об'ємного заморожування-відтавання склав $0,45$, а при локальному заморожуванні – $0,5$. Для зразків з цементного розчину коефіцієнт стійкості на розтяг при згині після 40 циклів об'ємного заморожування $= 0,5$, а при локальному впливі $= 0,78$.

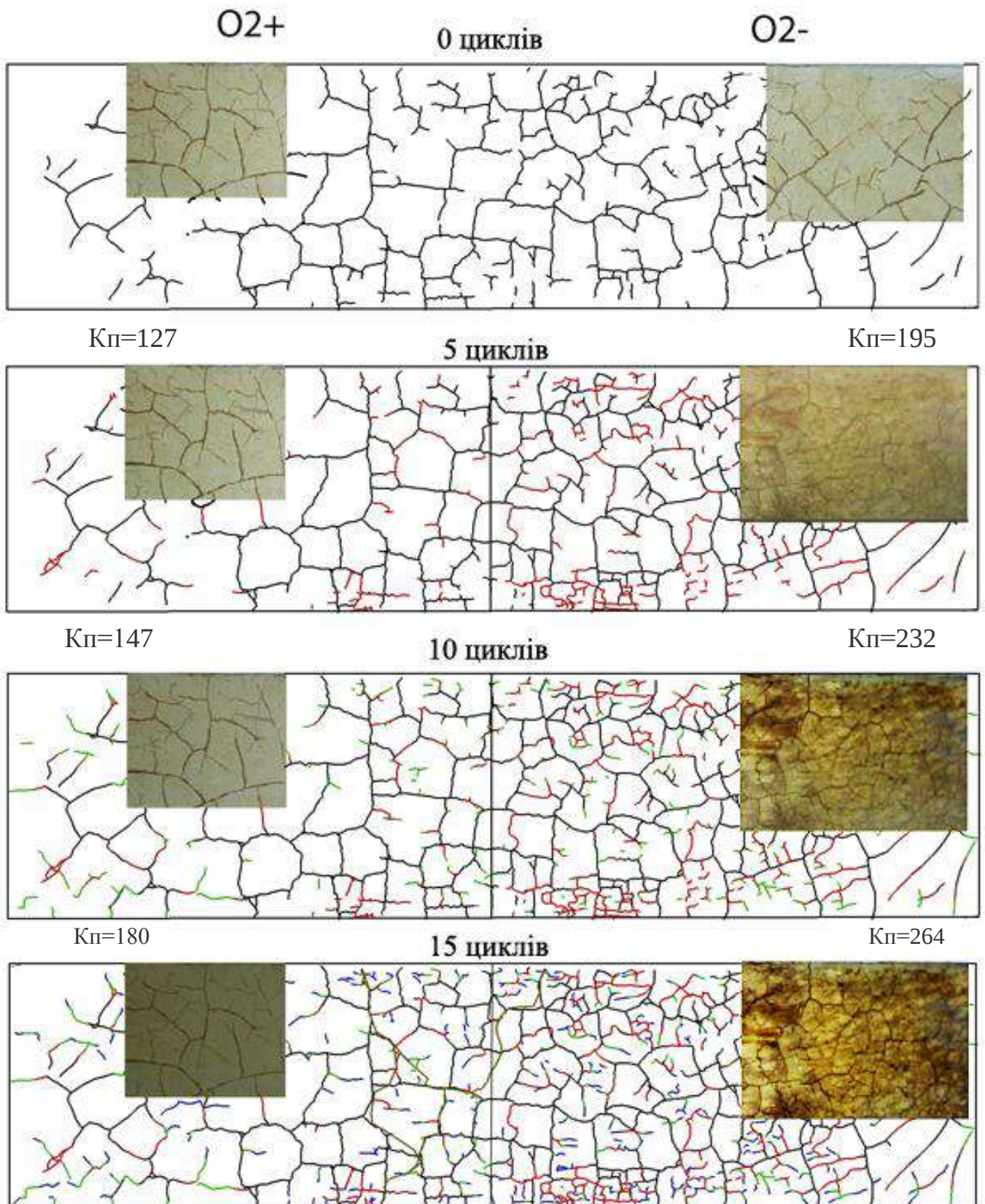


Рис. 5. Вплив кількості циклів заморожування та відтавання на зміну K_p при однобічному впливі

У п'ятому розділі приведені результати з впливу умов заморожування зразків на зміну характеристик бетону.

Об'єктом аналізу були зразки розміром $10 \times 10 \times 40$ см, виготовлені з бетону С30/35. Попередні дослідження показали, що в залежності від умов багаторазового заморожування-відтавання зразків залежить зміна структурних та фізико-механічних показників складових бетону, цементного каменю та розчину. Це зумовило поставити задачу з вивчення умов циклічного заморожування зразків на морозостійкість бетону.

Проведені дослідження показали, що для зразків з бетону зберігаються основні залежності по впливу умов дії від'ємних температур, 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_p більш ніж в 2 рази веде до зміни водопоглинання та до глибини карбонізації. При цьому кількісні характеристики K_p , W , V від 10 до 40% менші в випадку однобічного заморожування порівняно з об'ємним заморожуванням.

Дослідження дозволили встановити, що особливо чутливі до зміни умов заморожування міцність на розтяг при згині та міцність на розтяг при розколюванні зразків. В середньому стійкість бетону при локальній дії від'ємної температури на 10...20% більша порівняно зі стійкістю зразків при їх об'ємному заморожуванні. Схожий характер впливу умов заморожування-відтавання на зміну міцності на стиск зберігається при випробуваннях із застосуванням неруйнівних та руйнівних методів випробування.

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 матеріалоемності 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.

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 однобічне 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. Проведені дослідження показали, що коефіцієнт пошкодженості зразків розчину, при всебічному заморожуванні всебічно, збільшився в 9 разів. 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 суттєво 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 опублікованих праць за темою 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.

Особистий внесок здобувача – проаналізована початкова пошкодженість зразків композиційних будівельних матеріалів

2. Выровой В. Н., Суханов В. Г., Коробко О. А., Закорчемная Н. О., Непомнящий А. Н. Сопротивление морозному разрушению бетонов для дорожного покрытия. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2015. Вип. 58. С.88–95.

Особистий внесок здобувача – проаналізована початкова пошкодженість зразків КБМ

3. Коробко О. А., Выровой В. Н., Непомнящий 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.

Особистий внесок здобувача – проаналізована зміна пошкодженості зразків КБМ при циклічному заморожуванні-відтаванні

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.

Особистий внесок здобувача – проаналізована методика ефективного аналізу коефіцієнта пошкодженості

5. Коробко О. О., Выровой В. М., Уразманова Н. Ф., Непомнящий О.М. Підвищення стійкості будівельних виробів при малоцикловій утомі бетону. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне, 2018. Вип. 36. С. 124–131.

Особистий внесок здобувача – проаналізована стійкість КБМ при різних типах заморожування та відтавання

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

Особистий внесок здобувача – проаналізована зміна фізико-механічних характеристик при різних типах заморожування та відтавання зразків з бетону та розчину

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:

7. Непомнящий 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.

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

Особистий внесок здобувача – проаналізовані результати зміни типу впливу заморожування та відтавання на бетон, розчин та цементний камінь

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

Особистий внесок здобувача – проаналізований механізм однобічного заморожування

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Непомнящий 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.

Особистий внесок здобувача – проаналізований механізм однобічного заморожування

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.

Особистий внесок здобувача – проаналізована початкова пошкодженість зразків КБМ

12. Непомнящий 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.

Особистий внесок здобувача – проведений аналіз впливу умов заморожування на стійкість бетону

13. Непомнящий 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.

Особистий внесок здобувача – проведений аналіз впливу умов заморожування на зміну характеристик цементного розчину

14. Непомнящий А. Н., Выровой В. Н., Хоменко А. А., Макарова С. В. Воздействие условий замораживания на свойства композиционных

строительных материалов. *Моделирование и оптимизация строительных композитов* : матеріали междунар. сем. г. Одесса, 21-22 нояб. 2019 г. Одесса, 2019. С. 126–129.

Особистий внесок здобувача – проведений аналіз впливу умов заморожування на зміну характеристик цементного каменю)

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.

Особистий внесок здобувача – проведений аналіз впливу умов заморожування на стійкість бетону

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.

Особистий внесок здобувача – проведений аналіз впливу умов заморожування на зміну характеристик бетону

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.

Особистий внесок здобувача – проаналізований однобічний вплив заморожування на зміну характеристик КБМ

18. Непомящий О. М. Моделювання морозостійкості будівельних композитів при односторонньому заморожуванні. *Моделювання 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.

Особистий внесок здобувача – проаналізовані результати зміни типу впливу заморожування та відтавання на бетон, розчин та цементний камінь

АНОТАЦІЯ

Непомящий О.М. Механізм опору морозному руйнуванню будівельних конструкцій. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та вироби. Одеська державна академія будівництва та архітектури України – Одеса, 2021.

Дисертація присвячена вивченню впливу різних видів умов заморожування зразків (виробів, конструкцій) на морозостійкість будівельних композиційних матеріалів

В роботі було змодульовано однобічний та об'ємний вплив заморожування-відтавання на різні види КБМ та зафіксовано зміни їх характеристик в залежності від кількості проходження циклів заморожування та відтавання.

Проведені дослідження показали, що зміна фізико-механічних характеристик і морозостійкості будівельних матеріалів залежить від умов впливу від'ємних температур. При однобічному заморожуванні зміна маси, глибини карбонізації, коефіцієнтів пошкоженості і фізико-механічних характеристик відбувається менш інтенсивно в порівнянні з всебічним впливом від'ємних температур.

Отримані експериментальні результати дають підставу зробити висновок, що умови впливу від'ємних температур на вироби і конструкції грають істотну роль в їх здатності чинити опір морозному руйнуванню.

Результати виконаних досліджень були впровадженні на заводі ТОВ "ЕЛЕМЕНТ" при проектуванні та створенні залізобетонних елементів.

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

АННОТАЦИЯ

Непомящий А.Н. Механизм сопротивления морозному разрушению строительных конструкций. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. Одесская государственная академия строительства и архитектуры – Одесса, 2021.

Диссертация посвящена изучению воздействия разных условий замораживания образцов (изделий, конструкций) на морозостойкость строительных композиционных материалов.

В работе были смоделированы одностороннее и объемное воздействие замораживания-оттаивания на различные виды КСМ и зафиксировано

изменение их характеристик в зависимости от количества прохождения циклов замораживания и оттаивания.

Проведенные исследования показали, что изменение физико-механических характеристик и морозостойкости строительных материалов зависит от условий воздействия отрицательных температур. При одностороннем замораживании изменение массы, глубины карбонизации, коэффициентов поврежденности и физико-механических характеристик происходит менее интенсивно по сравнению с всесторонним воздействием отрицательных температур.

Полученные экспериментальные результаты дают основание сделать вывод, что условия воздействия отрицательных температур на изделия и конструкции играют существенную роль в их способности сопротивляться морозному разрушению. Результаты выполненных исследований были внедрены на заводе ООО "ЭЛЕМЕНТ" при проектировании и создании железобетонных элементов.

Ключевые слова: свойства материала, локальное и объемное замораживание и оттаивание, структурные изменения, трещины, внутренние деформации.

SUMMARY

Nepomyashchyi O.M. Mechanism of resistance to frost destruction of building structures. – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences. Specialty 05.23.05 – Building materials and products. – 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 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.

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. 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. 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 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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

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 are able to arbitrarily change their reaction depending on changes in environmental conditions. 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. 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.

Підписано до друку 18.11.2021 р.
Формат 60 X 84/16 Папір офісний Гарнітура Times
Друк-різографія. Ум.-друк. арк. 1,40.
Наклад 100 прим. Зам. №21-23

Видавець і виготовлювач:
Одеська державна академія будівництва та архітектури
Свідоцтво ДК № 4515 від 01.04.2013 р.
Україна, 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.
тел.: (048) 729-85-34, e-mail: rio@ogasa.org.ua

Надруковано в авторській редакції з готового оригінал-макету
в редакційно-видавничому відділі ОДАБА